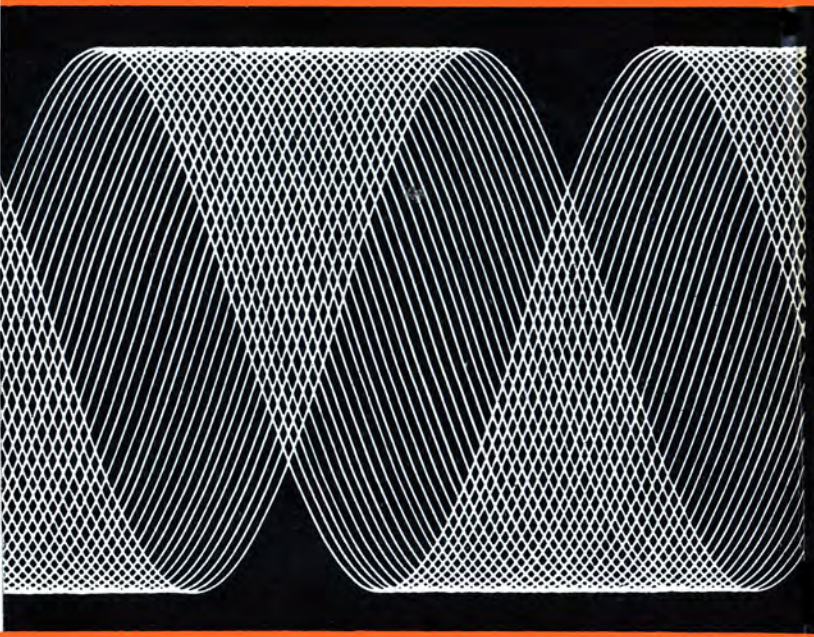
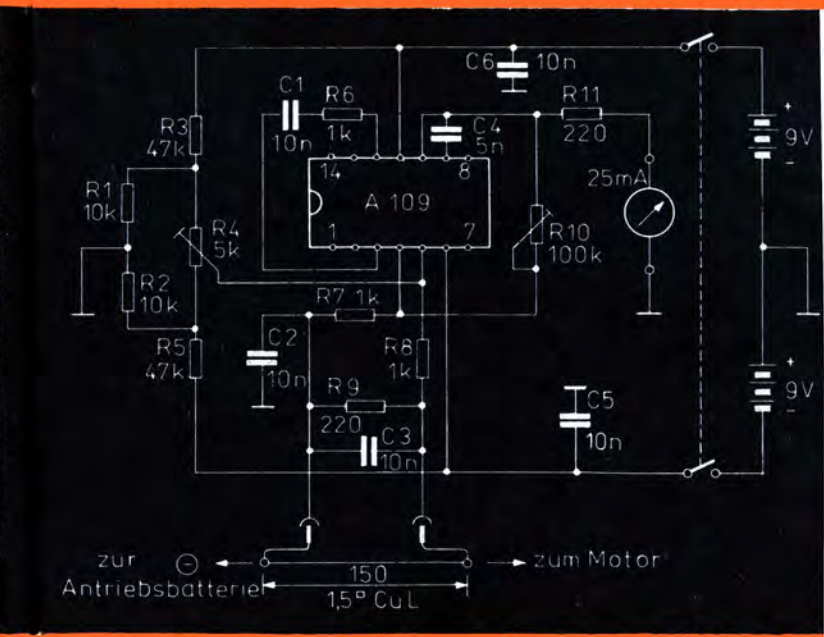
amateurreihe

electronica





Günter Miel

175

Elektronik des Modellantriebs

Teil 3

LEER

SCAN BY BLACKBURNER 2013

electronica · Band 175

Dr. GÜNTER MIEL

Elektronik des Modellantriebs

Teil 3: Modellantrieb, Hilfsgeräte

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

1. Auflage 1979, 1.—20. Tausend
© Militärverlag
der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) — Berlin, 1979

Inhaltsverzeichnis

1.	**Einleitung**	4
2.	**Wechselwirkung von Spannungsquelle und Elektromotor**	6
3.	**Entstörung des Elektromotors**	12
4.	**Hinweise zur Behandlung des Elektromotors**	21
5.	**Motorprüfstand**	32
6.	**Antrieb der Modelle**	39
7.	**Ladetechnik**	47
7.1.	Vorbemerkungen	47
7.2.	Berechnung eines Netztransformators	48
7.3.	Ladezeitbestimmung	56
7.4.	Laden mit Vorwiderstand (W-Kennlinie)	59
7.5.	Laden mit Konstantstrom	67
7.6.	Laden mit Spannungsbegrenzung	68
7.7.	Laden mit Strom- und Spannungsbegrenzung (*UI*-Kennlinie)	75
7.8.	Schnelladen	77
7.9.	Elektronik-Schnelladegerät	81
7.10.	Reaktivierung von Primärzellen	87
8.	**Tiefentladungsschutz**	90
8.1.	Tiefentladungsschutzschalter	91
8.2.	Elektronikschalter *Volt-Controller*	99
8.3.	Elektronikschalter mit Tiefentladungsschutz	100
9.	**Kontaktlose elektronische Drehzahlmesser**	103
9.1.	Kontaktloser elektronischer Drehzahlmesser mit analoger Anzeige	103
9.2.	Kontaktloser elektronischer Drehzahlmesser mit digitaler Anzeige	113
9.3.	Gleichstrommeßzusatz zum Vielfachmeßgerät	116
10.	**Schlußbemerkungen**	121
11.	**Literatur- und Quellenverzeichnis**	122

1. Einleitung

Die Aufteilung des Inhalts auf 3 Broschüren zwingt den Autor bei der Gliederung zu verschiedenen Kompromissen. Im Band 3 sind daher zum Teil aus Platzgründen die Erörterung der Wechselwirkung von Spannungsquelle und Elektromotor, spezielle Hinweise zur Handhabung des Motors einschließlich Prüfstand, aber auch die unterschiedlichen Varianten von Ladegeräten, der Tiefentladungsschutz und der Drehzahlmesser zusammengefaßt. Auf modelltechnische Probleme wird in diesem Zusammenhang nur kurz hingewiesen. Der Leser kann sich über diese Zusammenhänge in der Modellbauliteratur informieren.

Neben dem Grundlagenwissen (Band 1 und Band 2) sind für den Amateur die anwendungstechnischen Kenntnisse im Band 3 nicht minder wichtig. Der Band 3 soll dem Amateur helfen, die physikalische Wechselwirkung von Spannungsquelle und Motor richtig zu verstehen und daraus Schlußfolgerungen für den Entwurf von Modellantrieben abzuleiten. Er enthält ferner das Wissen, das der Amateur benötigt, wenn er einen Motor auf dem Prüfstand richtig untersuchen will. Beides ist Voraussetzung, um optimale Leistungen mit einem Modell zu erzielen.

Die Anzahl der beschriebenen Ladegeräte mag zunächst groß erscheinen, aber jeder Akkumulator erfordert eine spezielle, angepaßte Ladetechnik. Nur der richtig geladene Akkumulator wird im Modell die volle Leistung bringen und seine mögliche Lebensdauer erreichen. Ein hoher Aufwand bei der Ladetechnik lohnt sich für den Amateur immer. Damit wird sein Modell nicht nur zuverlässiger, sondern es läßt sich, auf die Dauer sogar erheblich, Geld sparen.

Bei einigen Schaltungen werden dem Leser die kompletten Bauunterlagen vorgestellt. Er kann die dabei üblichen Konstruktionsprinzipien dann ohne weiteres bei eigenen Entwicklungen anwenden.

Allerdings sei besonders beim Bau von netzgespeisten Ladegeräten ausdrücklich auf die geltenden Sicherheitsbestimmungen für elektrische Geräte verwiesen. Wer diesbezüglich nicht Fachmann ist, sollte sich vor dem Bau Rat holen und das fer-

tige Gerät von einem Fachmann vor der Inbetriebnahme überprüfen lassen. Falsche Sparsamkeit an dieser Stelle (fehlerhafte Bauteile, besonders ein schadhafter oder ein ungeeigneter Netztransformator, Zeitnot, Scheu vor dem Weg zum oder die Kosten für den Fachmann u. ä.) kann in der Folge nicht nur teuer zu stehen kommen, sondern ist manchmal auch lebensgefährlich.

2. Wechselwirkung von Spannungsquelle und Elektromotor

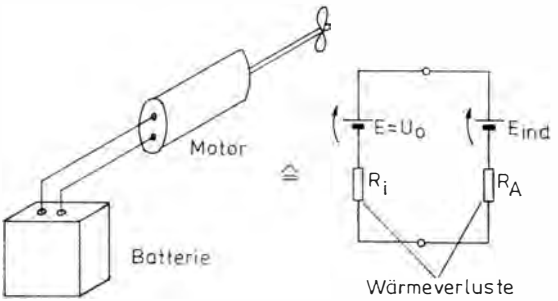
Im Band 1 wurde der Elektromotor mit seinen Steuer- bzw. Schaltzusätzen behandelt und im Band 2 die Spannungsquellen. Beim Antrieb wirken diese Elemente im Antriebsstromkreis zusammen. Durch die gegenseitige Beeinflussung der Elemente ergeben sich ganz bestimmte technische Verhaltensweisen. Sie werden im folgenden näher betrachtet, um daraus Schlußfolgerungen für die Auslegung des Antriebs abzuleiten.

Die in der Spannungsquelle chemisch gespeicherte Energie wird in elektrische Energie umgewandelt, durch die Leitung zum Motor transportiert und dort in mechanische Energie umgewandelt (Bild 2.1). Das elektrische Verhalten der Spannungsquelle läßt sich durch die Urspannung E und den Innenwiderstand R_i beschreiben. In analoger Weise wird das Verhalten des Elektromotors durch seinen Ankerwiderstand R_A und die induzierte Gegenspannung E_ind im Anker charakterisiert. Der von der Urspannung E im Antriebsstromkreis angetriebene Strom hängt von den Größen R_i, R_A und E_ind ab, wobei E_ind zu E entgegengerichtet ist. Der Wert von E_ind ist nach

$$E_\mathrm{ind} = c_2 \Phi n, \tag{1}$$

mit E_ind — im Anker induzierte Spannung, c_2 — Motorkonstante Φ — Fluß im Anker, n — Drehzahl des Ankers,

Bild 2.1 Energieumsatz im Antriebsstromkreis



direkt abhängig vom Fluß und von der Ankerdrehzahl. Bei permanenterregten Motoren kann angenommen werden, daß der Fluß konstant ist. Die Drehzahl des Ankers ändert sich aber in weiten Grenzen. Im Einschaltmoment tritt ein großer Stromstoß auf, der nur von $R_i + R_A$ begrenzt wird. In guter Näherung kann man annehmen, daß die Leerlaufspannung U_o gleich der Urspannung E ist. Damit gilt für den Einschaltstrom bei $n = 0$ und folglich $E_{ind} = 0$:

$$I_E = \frac{U_o}{R_i + R_A}, \tag{2}$$

mit I_E — Einschaltstrom, U_o — Leerlaufspannung der Spannungsquelle, R_i — Innenwiderstand der Spannungsquelle, R_A — Ankerwiderstand.

Der Anlaufstrom nimmt damit bei leistungsfähigen Antrieben und Direkteinschaltung erhebliche Werte an. Da meist nicht die Höhe des Stromes, sondern die Belastungszeit die entscheidende Rolle spielt, soll der direkt eingeschaltete Antrieb nur eine geringe Trägheit haben und unbelastet hochlaufen. Nur auf diese Weise wird eine kurze Hochlaufzeit erreicht. Da die schlagartige Belastung bei Direktanschaltung auch zu erheblichen mechanischen Beanspruchungen der Antriebsaggregate führt, empfiehlt es sich, mechanisch dämpfende Kupplungen einzubauen. Zum Beispiel wird bei Elektroantrieben für Klappluftschrauben eine den Laststoß dämpfende Gummikupplung benutzt.

Nach dem Hochlaufen des Motors läßt sich der Strom im Antriebsstromkreis nach

$$I = \frac{U_o - E_{ind}}{R_i + R_A}, \tag{3}$$

mit I — Strom im Antriebsstromkreis, U_o — Leerlaufspannung der Spannungsquelle, E_{ind} — induzierte Spannung im Anker, R_i — Innenwiderstand der Spannungsquelle, R_A — Ankerwiderstand, berechnen.

Die Drehzahl des Motors hängt von der Belastung ab. Die höchste Drehzahl des Motors ist die *Leerlaufdrehzahl*. Wird der Motor von außen angetrieben, so daß seine Drehzahl die Leerlaufdrehzahl übersteigt, dann arbeitet er als Generator. Von einem gewissen Punkt an, wenn $E_{ind} > U_o$, kehrt sich die Strom-

richtung um, und der Akkumulator wird geladen. Im praktischen Modellbetrieb kommt dieser Fall wohl kaum vor. Das würde z. B. für ein Automodell bedeuten, daß es schneller rollt, also geschoben wird, als es mit eigener Motorkraft fährt.

Viel wichtiger als diese Überlegungen sind die Leistungsbetrachtungen für den Antriebsstromkreis, da sich daraus direkte Rückschlüsse auf Leistung und Betriebszeit des Antriebs und nicht zuletzt auch auf die Betriebskosten ziehen lassen. Für Bild 2.1 kann man folgende Leistungsbilanz formulieren:

$$EI - I^2R_\mathrm{i} = E_\mathrm{ind}I + I^2R_\mathrm{A}, \tag{4}$$

$$P_\mathrm{el} - P_\mathrm{Vi} = P_\mathrm{mech} + P_\mathrm{VA}, \tag{5}$$

mit $EI = P_\mathrm{el}$ — von der Spannungsquelle erzeugte Leistung, I^2R_i — Verlustleistung (Wärme) der Spannungsquelle, $E_\mathrm{ind}I = P_\mathrm{mech}$ — in mechanische Leistung umgeformte elektrische Leistung, $I^2R_\mathrm{A} = P_\mathrm{VA}$ — Verlustleistung (Wärme) des Ankers.

Aus diesen Gleichungen sind die wichtigsten Schlußfolgerungen für die Auslegung des Antriebs abzuleiten. Dabei werden die beiden Betriebsfälle *Dauerleistung* und *Höchstleistung* unterschieden.

Dauerleistung

Dieser Betriebsfall ist dadurch gekennzeichnet, daß die in der Spannungsquelle erzeugte Leistung möglichst vollständig, also verlustarm, im Motor umgesetzt wird. Das bedeutet aber, daß der innere Spannungsabfall IR_i und der Ankerspannungsabfall IR_A möglichst klein werden müssen. Spannungsquelle und Motor sind danach auszuwählen. Man sollte den Antrieb aber auch so auslegen, daß der Strom I_E klein bleibt, da er nach Gl. (2) quadratisch in den Verlust eingeht. Im Antrieb muß jedoch eine bestimmte Leistung zur Erzielung der Nenngeschwindigkeit des Modells umgesetzt werden. Demzufolge bleibt nur übrig, die Betriebsspannung heraufzusetzen. Da

$$P_\mathrm{el} = U_\mathrm{B}I, \tag{6}$$

mit P_el — elektrische Leistung, U_B — Klemmenspannung der Batterie, I — fließender Strom,

gilt, läßt sich die gleiche elektrische Leistung auch mit einer hohen Spannung und mit einem kleinen Strom erzeugen. Die obere Grenze für den Modellbetrieb liegt bei $U_\mathrm{o} = U_\mathrm{B} = 42\ \mathrm{V}$

als zulässigem Wert für die Berührungsspannung. Hinzu kommt, daß, wie im Band 1 nachgewiesen, der Elektromotor bei höherer Betriebsspannung einen besseren Wirkungsgrad hat. Die Wahl der Klemmenspannung wird aber noch von anderen Gesichtspunkten beeinflußt. Es muß für den konkreten Anwendungsfall der richtige Kompromiß gefunden werden.

Höchstleistung

In der Schiffsmodellklasse *F 1-E* kommt es darauf an, ohne Rücksicht auf die vorhergehenden Überlegungen innerhalb weniger Sekunden (20 bis 40 s) die maximale Leistung aus der Spannungsquelle zu entnehmen und im Motor umzusetzen. Durch Anwendung der Gln. (3), (4) und (5) erhält man

$$P_{\text{mech}} = E_{\text{ind}} I,$$

$$P_{\text{mech}} = E_{\text{ind}} \frac{U_{\text{o}} - E_{\text{ind}}}{R_{\text{i}} + R_{\text{A}}}. \tag{7}$$

Aus dem Differentialquotienten

$$\frac{\mathrm{d}P_{\text{mech}}}{\mathrm{d}E_{\text{ind}}}$$

ergibt sich für $P_{\text{mech max}}$ die Bedingung:

$$E_{\text{ind}} = \frac{U_{\text{o}}}{2}. \tag{8}$$

Das bedeutet, wenn der Motor auf seine halbe Nenndrehzahl (lineare Drehzahl — Drehmomentabhängigkeit vorausgesetzt!) abgebremst wird, gibt er seine maximale mechanische Leistung ab. Aus Gl. (5) folgt ferner, daß die andere Hälfte $U_{\text{o}}/2$ an $R_{\text{i}} + R_{\text{A}}$ als Verlustspannungsabfall auftritt und damit in Wärme umgewandelt wird. Bei einem Hochleistungsantrieb mit angenommen $U_{\text{o}} = 15$ V und $I_{\text{max}} = 20$ A (diese Werte werden in der Klasse *F1 -E 1 kg* erreicht) entsteht eine Verlustleistung von

$$P_{\text{V max}} = \frac{U_{\text{o}}}{2} I_{\text{max}}, \tag{9}$$

$$P_{\text{V max}} = \frac{15\ \text{V}}{2} \cdot 20\ \text{A} = 150\ \text{W}.$$

Diese Verlustleistung von 150 W muß vom Akkumulator und vom Motor als Wärme abgeführt werden. Daraus ist ersichtlich,

welche Bedeutung die gute Kühlung von Akkumulator und Motor hat und daß außerdem Höchstleistungen nur kurz (einige Sekunden) andauern sollten.

Zwischen den Fällen Hochleistung und Dauerleistung läßt sich nur schwer eine klare Grenze ziehen. Es gibt Anwendungsfälle bei Modellantrieben, z. B. Elektroflug, mit denen man zwar Hochleistungen erzielen will, die aber nach der vorstehend getroffenen Unterscheidung auch wichtige Merkmale der Dauerleistung aufweisen. In welcher Richtung man den Kompromiß schließt, muß im konkreten Fall entschieden werden.

Bei den beiden Betriebsfällen wurde zunächst das Problem der Verbindungsleitungen vernachlässigt. Motor und Spannungsquelle sind über elektrische Leitungen miteinander verbunden, die einen Widerstand haben. Selbst wenn es sich im Modell nur um kurze Leitungen und damit um kleine Widerstände handelt, bei der Leistungsbilanz fallen sie ins Gewicht.

Der auf den Zuleitungen entstehende Verlust erscheint im Ersatzschaltbild (Bild 2.2) als Leitungswiderstand R_L. In ihm sind alle ohmschen Widerstände, außer R_i und R_A, wie der Widerstand der Leitungsdrähte, die Kontaktwiderstände, der Widerstand des Drehzahlstellers, die Übergangswiderstände an Schaltern u. a. zusammengefaßt. Für die Leistungsumsetzung im Motor wirkt R_L wie eine Erhöhung des Innenwiderstands R_i mit allen seinen nachteiligen Folgen. Die Schlußfolgerungen daraus sind:

— Die Zuleitungen zum Motor werden so kurz wie möglich gewählt. Sie müssen einen ausreichenden Querschnitt haben (möglichst 1 bis 1,5 mm²).

— Kontaktstellen wie Steckkontakte, Schaltkontakte, Klemmstellen u. a. sind auf die Mindestanzahl zu beschränken. Lötverbindungen sind nicht nur sicherer, sondern auch verlustärmer als Klemmverbindungen.

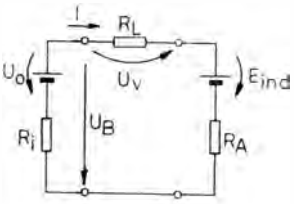


Bild 2.2
Einfluß des Leitungswiderstands R_L

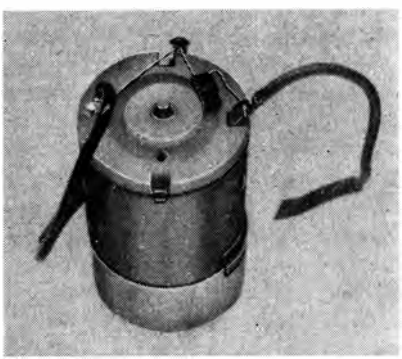
— Über Möglichkeiten zur Senkung der Verluste beim Drehzahlstellen kann im Band 1 nachgelesen werden.
— Im Rahmen des Möglichen ist eine hohe Klemmenspannung, aber ein kleiner Strom zu wählen. Wenn die Klemmenspannung verdoppelt wird, sinkt der Wert des Stromes I_E auf die Hälfte und damit der Leitungsverlust $I_E^2 R_L$ auf $\frac{1}{4}$.

Es gibt allerdings für den Modellbetrieb auch Bedingungen, unter denen sich die eine oder andere Forderung nicht erfüllen läßt. Das kann z. B. die Spannungsfestigkeit des Drehzahlstellers oder die Beschaffbarkeit bestimmter Motoren bzw. Spannungsquellen sein. Für den Elektroflug hat es sich z. B. als sehr praktisch erwiesen, die Spannung des Antriebsakkumulators so zu wählen ($U_B = 8{,}4$ V), daß er auf dem Flugfeld aus dem Kfz-Akkumulator in 20 min schnellgeladen werden kann. Antriebslösungen für Flugmodelle mit höherer Klemmenspannung haben sich auf die Dauer nicht bewährt, da die Nachteile einer zusätzlichen Ladestation (Mehrkosten) schwerer wiegen als die Wirkungsgradminderung (kürzere Motorlaufzeit bzw. geringeres Leistungsgewicht) bei kleinerer Klemmenspannung.

3. Entstörung des Elektromotors

Bei der Kommutierung des Gleichstrommotors entstehen in schneller Folge Schaltfunken, die man auch als *Bürstenfeuer* bezeichnet. Aus den Darlegungen zur Kommutierung in Band 1 geht hervor, daß sich das Bürstenfeuer nie ganz vermeiden läßt und vor allem bei hohen Belastungen erheblich sein kann. Durch das Bürstenfeuer wird die Lebensdauer von Bürsten und Kommutator stark gemindert und ruft als Nebenerscheinung elektromagnetische Schwingungen in einem breiten Frequenzbereich hervor. Diese wirken als Funkstörungen. Digitalanlagen reagieren auf derartige Funkstörungen, besonders wenn sie in unmittelbarer Nachbarschaft auftreten, recht empfindlich. Die Servos beginnen zu zucken oder laufen auf Vollausschlag und klemmen. Ähnlich reagiert ein gestörter Fahrtregler, der dann alle möglichen Fahrtstufen in eigenwilliger Weise durchspielt. Damit wird schon klar, daß Funkstörungen jeder Art, ob von außen oder vom Motor im Modell, von der Empfangsanlage fernzuhalten sind. Oberstes Gebot ist dabei: Die Störung wird an der Quelle beseitigt. Man benötigt für den Elektroantrieb also Motoren, die einwandfrei kommutieren und damit von vornherein nur geringe Funkstörungen hervorrufen. Stört bereits ein neuer Motor sehr stark, so sind diese Störungen mit anderen Mitteln kaum zu beseitigen. Starkes Bürstenfeuer entsteht bei Unsymmetrien in der Wicklung (neu wickeln) oder bei falscher Lage der neutralen Zone (Bürstenbrücke drehen). Nach längerer Laufzeit kann das Bürstenfeuer auf den Verschleiß (Kommutator verbrannt oder unrund, Lamellenisolation steht über, Bürsten verbrannt, Riefenbildung, Lager ausgeschlagen, Läufer durch Wicklungsverlagerung unwuchtig o. ä.) oder auf Schäden (mechanischer Schaden am Kollektor, Wicklungsschluß o. a.) zurückzuführen sein. Hinzu kommt, daß man aus technologischen und ökonomischen Gründen einen billigen Kleinmotor, der mit einem jährlichen Produktionsausstoß von mehreren hunderttausend oder sogar einigen Millionen Stück ein Massenartikel ist, nicht mit höchster Präzision herstellen kann. Diese Tatsache erfordert zusätzliche Maßnahmen zur Motorentstörung.

Da beim Fahrtregler eine leitende Verbindung zwischen Motor und Empfänger besteht, ist die Funkentstörung möglichst dicht am Kommutator vorzunehmen, damit die Störschwingungen nicht abgestrahlt werden können oder auf die Leitungen gelangen. Die im Ankereisen eingebetteten Ankerspulen haben eine relativ hohe Selbstinduktivität. Beim Stromwenden ist sie Ursache für die entstehenden Spannungsspitzen und das damit verbundene Bürstenfeuer (s. Band 1). Diese induzierten Spannungen können Werte vom Mehrfachen der Klemmenspannung des Motors erreichen. Die Entstörmaßnahmen müssen darauf gerichtet sein, die schädlichen Wirkungen der in den Ankerspulen auftretenden Selbstinduktionsspannungen zu beheben, denn die Ursache selbst, **die Selbstinduktion der Ankerspulen, kann nicht beseitigt werden.** Eine bewährte Methode besteht darin, Selbstinduktivitäten durch zugeschaltete Kapazitäten zu kompensieren. Der Kondensator wandelt die in der Spule gespeicherte magnetische Feldenergie in elektrische Feldenergie um. Der Entstörkondensator müßte genau auf die Selbstinduktivität der Ankerspulen, den Ankerstrom und die Drehzahl des Motors abgestimmt sein, um die optimale Wirkung zu erzielen. Praktisch läßt sich das wegen der Exemplarstreuungen der Motoren und der stark schwankenden Belastung und Drehzahl nicht verwirklichen. Daher muß man bei der Dimensionierung der Kondensatoren einen brauchbaren Kompromiß finden. Im folgenden werden einige bewährte *Entstörschaltungen*, auch als *Entstörfilter* bezeichnet, beschrieben. Die einfachste Form der Entstörung besteht darin, eine Bürste



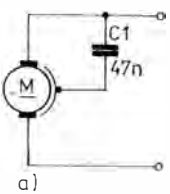


Bild 3.1
Motorentstörung mit einem Kondensator;
a — Stromlaufplan,
b — Anbau am Motor

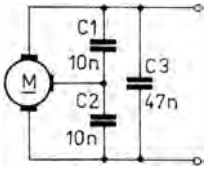


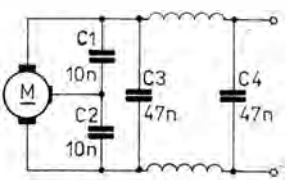
Bild 3.2
Motorentstörung mit gleichstrommäßig getrenntem Gehäuse

(—) leitend mit dem Metallmantel des Motors zu verbinden. Das Metallgehäuse wirkt als Abschirmung. Motoren mit Plastgehäuse kann man mit einer Abschirmkappe versehen. Die an der anderen Bürste (+) auftretenden Spannungsspitzen werden durch den Kondensator (47 nF) geglättet (Bild 3.1). Er wirkt damit ähnlich wie der Ladekondensator in Gleichrichterschaltungen.

Es gibt aber auch Anwendungen, bei denen die Kohlebürsten vom Motorgehäuse isoliert sein müssen, da sonst ein Kurzschluß in der Anlage eintritt. Für diesen Fall wird der HF-Kurzschluß zwischen beiden Bürsten und dem abschirmenden Gehäuse über die Kondensatoren C1 und C2 hergestellt (Bild 3.2). Gleichzeitig sind die Bürsten durch C1 und C2 gleichstrommäßig vom Motorgehäuse getrennt. Verbleibende HF-Reste glättet C3. Als Entstörkondensatoren nimmt man meist keramische Kondensatoren, da sie eine geringe Eigeninduktivität haben.

Reichen auch diese Entstörmaßnahmen nicht aus, so muß man ein Entstörfilter zwischen Motor und Anlage einbauen. Bei dem Entstörfilter werden zusätzlich zu der Kondensatorkombination nach Bild 3.2 noch 2 Drosseln in die Zuleitungen geschaltet (Bild 3.3). Die Drosseln bedeuten für die HF-Schwingungen einen hohen Widerstand, während C4 verbliebene HF-Reste kurzschließt. Damit die Zuleitungen zum Entstörfilter möglichst kurz sind, wird das Filter auf einer Leiterplatte mon-

Bild 3.3 Entstörfilter



C4 kann evtl. entfallen

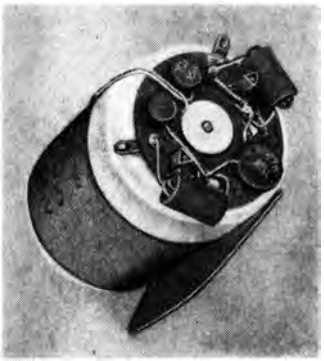


Bild 3.4
Anbau des Entstörfilters am Motor

tiert und direkt am Lagerschild angebracht (Bild 3.4). Man kann ein solches Filter auch steckbar ausführen und hat damit die Möglichkeit für schnellen Motorein- und -ausbau. Zu beachten ist, daß die Drosseln für die Motorströme ausgelegt sind. Bei Strömen > 2 A verwendet man zylindrische Ferritkerne, durch deren Längsbohrungen die Wicklung gefädelt wird (Bild 3.5).

Bei Elektroantrieben von Flugmodellen, bei denen die Schraube direkt auf der Motorwelle angebracht ist, kann die Unwucht der Schraube starke Vibrationen des Motors verursachen. Für diesen Anwendungsfall sollten die Bauelemente des Entstörfilters mit Silikonkautschuk festgelegt werden.

Für einwandfrei kommutierende Motoren, die bis zur Nennleistung belastet werden, reichen diese Entstörmaßnahmen in der Regel aus. Die Störeinflüsse des Motors auf die Empfangsanlage lassen sich weiter dadurch mindern, daß man den Empfänger räumlich möglichst weit entfernt von der Antriebsan-

Bild 3.5
Entstördrossel für Ströme bis 10 A

lage (Motor, Schalter, Batterie) im Modell einbaut. Ferner ist zu beachten, daß die Antenne und deren Zuleitung nicht in der Nähe der Antriebsanlage angebracht werden. Genauso wenig sollte man die „Fahrstromleitungen" am Empfänger vorbeiführen. Lassen sich diese Grundsätze bei Schiffsmodellen (LüA $>$ 1 m) noch einigermaßen verwirklichen, so ist es bei dem kompakten Anlageneinbau im Flugmodell schon problematischer.

Man sieht daraus, daß alle Möglichkeiten zur Entstörung direkt am Motor ausgeschöpft werden müssen, um die sichere Funktion der Fernsteueranlage zu gewährleisten.

Da man Hochleistungsantriebe wie im Rennboot oder im Flugmodell in der Regel nicht mit dem Fahrtregler betreibt, sondern nur mit dem 1- oder 2fachen Fahrstufenschalter, besteht eine galvanische Trennung zwischen Fahr- und Empfängerstromkreis. Damit ist die direkte Übertragung der Störimpulse ausgeschaltet und der Einfluß der Motorstörungen wesentlich geringer. Man sollte sich daher vor dem Aufbau des Modellantriebs auch unter dem Aspekt der Entstörung genau überlegen bzw. vorher ausprobieren, welche Variante des Drehzahlstellens angewendet wird. Alle Varianten mit galvanischer Trennung wie die verschiedenen Fahrstufenschalter mit Relais oder Servo mit Schalter, aber auch das stufenlose Drehzahlstellen mit Servo und Zusatzaggregat bieten den Vorzug besserer Entstörmöglichkeiten.

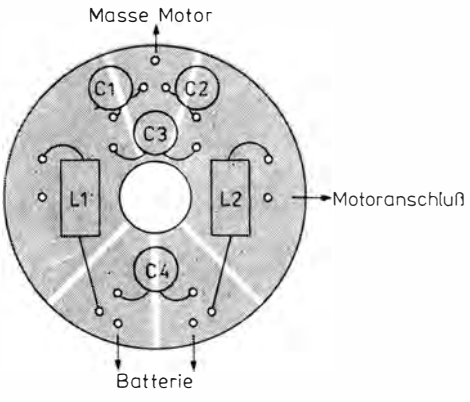
Wenn die beschriebenen Maßnahmen nicht ausreichen, kann man noch folgendes versuchen. Da bei galvanischer Trennung von Fahr- und Empfängerstromkreis die Störfrequenz nur über Strahlung in den Empfänger bzw. dessen Antenne gelangen kann, wird der Motor abgeschirmt bzw. dessen Metallgehäuse mit der Minusleitung verbunden. Für die Fahrstromleitungen verwendet man dann abgeschirmtes Kabel. Die Abschirmung (geflochtener Außenleiter) bildet dabei die Minusleitung. Da bei Hochleistungsantrieben auch hohe Ströme, meist $I > 10$ A, fließen, muß der Querschnitt der abgesehirmten Leitung für diese Ströme ausgelegt sein. Wählt man zu geringe Querschnitte, so werden die Spannungsverluste auf den Zuleitungen zu groß. Diese überlasteten Leitungen wirken wie eine elektrische Heizung, die man aber im Modell nicht braucht. Im Gegenteil, möglichst viel der im Akkumulator gespeicherten elektrischen Energie soll für den Vortrieb des Modells genutzt werden.

Da Elektrorennboote mit einer Empfängerreichweite von etwa 150 m auskommen, kann man noch zusätzlich den Empfänger manipulieren, indem man ihn einfach unempfindlich macht (geringere Verstärkerwirkung im HF- und ZF-Teil). Damit wird das Sendersignal geschwächt und die normale Reichweite von etwa 1500 m auf 1/10 vermindert. Im gleichen Maße werden auch Störimpulse geschwächt. Zu dieser Methode ist aber nur dann zu raten, wenn man sich für das Elektrorennboot eine gesonderte Empfangsanlage aufbaut.

Es sei noch einmal nachdrücklich darauf hingewiesen, daß selbst noch so gute Entstörmaßnahmen bei einem schlecht kommutierenden Motor keinen Erfolg zeigen. Es werden daher die wichtigsten Punkte, die noch vor dem Ergreifen von Entstörmaßnahmen zu beachten sind, regelartig zusammengefaßt:

- Oberstes Gebot: Am Motor sollte man nicht sparen! Minderwertige, billige Motoren für Spielzeugantriebe kommutieren meist schlecht. Besonders für Hochleistungsantriebe benötigt man Motoren, die mechanisch und elektrisch den Anforderungen genügen.
- Besteht die Möglichkeit der Wahl, so nimmt man einen Motor mit mehr als 3 Kommutatorlamellen, da mehrpolige Motoren besser kommutieren als 3polige.
- Von mehreren Motoren mit gleichen Kennwerten wählt man

Bild 3.6 Bestückungsplan des Entstörfilters



den, der auch unter Last (auf dem Prüfstand ausprobieren!) einwandfrei kommutiert.

- Eine Verbesserung der Kommutierung ist eventuell durch geringfügiges Drehen der Bürstenbrücke zu erreichen. Die neutrale Zone wird unter Last optimal eingestellt.
- Der Kommutator muß einwandfrei sein, rundlaufen, keine Riefen oder Rillen haben, eine metallisch blanke bis leichtbrünierte Oberfläche aufweisen, die Nutisolation sollte vertieft sein, darf aber auf keinen Fall die Lamellen überragen.
- Die Bürsten müssen satt aufliegen und eingelaufen sein.
- Die Bürstensorte muß dem Motor und der Belastung angepaßt sein.
- Die Lager sollen leicht, aber spielfrei laufen.
- Der Rotor muß ausgewuchtet sein.
- Die Wicklung muß symmetrisch und elektrisch einwandfrei sein (kein Wicklungsschluß).
- In gewissem Maße läßt sich die Kommutierung durch Erhöhen des Bürstendrucks verbessern. Dabei tritt aber ein stärkerer Verschleiß von Kommutator und Kohlebürsten auf.
- Überdecken die Kohlebürsten zuviel oder zuwenig Kommutatorlamellen, so hat das ebenfalls Bürstenfeuer zur Folge. Bei Motoren, die nicht mehr original bestückt sind, lohnt sich also ein Versuch in dieser Richtung.

Praktische Versuche mit Modellbootantrieben brachten auch folgendes Ergebnis: Verwendet man zur Anpassung des Motors an eine bestimmte Schraube ein Getriebe, so erzeugen Getriebe mit Zahnrädern aus unterschiedlichen Metallen, z. B. Messing und Stahl, ebenfalls Störimpulse, die die Empfangsanlage beeinflussen können. Das bedeutet, daß man Getriebe für ferngesteuerte Modelle möglichst aus Kunststoffzahnrädern aufbaut, zumindest aber nie 2 Metallzahnräder aufeinander arbeiten läßt, sondern ein Kunststoffzahnrad zwischenschaltet. Die Erscheinung ist auf die Stellung der Metalle in der elektrochemischen Spannungsreihe zurückzuführen. Man sieht, auch solche Dinge sind gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Im Zusammenhang mit der Motorentstörung wird auch die Funktion der Freilauf- oder Schutzdiode für die Halbleiterbauelemente klarer. Bei geschalteten Spulen, ganz gleich, ob es sich dabei um Relais- oder Ankerwicklungen handelt, entstehen beim Abschalten des fließenden Stromes derartig hohe

Selbstinduktionsspannungen, daß die Halbleiterbauelemente gefährdet sind (Spannungsdurchschlag der Sperrschicht). Zum Beispiel kann an den Klemmen einer Spule, die von 2 V Betriebsspannung abgeschaltet wird, eine Selbstinduktionsspannung bis 500 V auftreten. Diese Selbstinduktionsspannungen erreichen also Werte bis zum Mehrfachen der Batterie- bzw. Betriebsspannung. Ge-Transistoren sind durch diese Induktionsspannungen mehr gefährdet als Si-Transistoren, da letztere in der Regel höhere Sperrspannungswerte aufweisen. Deshalb sollten für pulsgesteuerte Motoren und geschaltete Relais Bauelemente (Transistoren) ausgewählt werden, deren Grenzwerte der Spannung $U_{CE\,max}$ das 5- bzw. Mehrfache der Betriebsspannung betragen.

Die Freilauf- oder Schutzdiode (s. Band 1) wird parallel zur Spule in Sperrichtung zur Betriebsspannung geschaltet (Bild 3.7). Leitet der Transistor, so fließt der Strom über die Spule und nicht durch die Diode. Schaltet der Transistor ab, dann ist die Selbstinduktionsspannung so gerichtet, daß sie den Stromfluß in der vorherigen Richtung aufrechterhaltend wirkt. Am Kollektor würde also eine hohe positive Spannung auftreten; für diese Spannung ist aber die Diode in Durchlaßrichtung geschaltet, so daß sie die Selbstinduktionsspannung kurzschließt. Die Diode muß daher impulsmäßig hoch belastbar sein.

Gleichrichterdioden kleiner Leistung sind für diesen Zweck geeignet. Zum Beispiel kann die Gleichrichterdiode *SY 202* für $I_F = 2$ A Dauergrenzstrom mit einem Impulsgrenzstrom (10 ms) von $I_{FSM} = 50$ A belastet werden. Sie eignet sich als Freilaufdiode für einen Elektromotor bis 10 A Ankerstrom.

Als Schutzdiode für Relais reicht bereits eine Si-Schaltdiode aus. Die Diode *SAY 12* kann mit einem Durchlaßstrom von

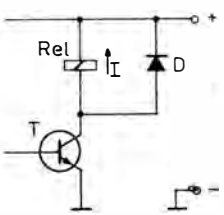


Bild 3.7
Wirkung der Schutzdiode

$I_F = 300$ mA oder mit einem Stoßstrom von $I_{FSM} = 2$ A belastet werden.
Weitere Hinweise zu Schaltungen und geeigneten Bauelementen sind in Band 1 nachzulesen.

4. Hinweise zur Behandlung des Elektromotors

Setzt man den Elektromotor unter Beachtung seiner Daten und Eigenschaften im Modell ein, so wird er eine hohe Lebensdauer erreichen. Regelmäßige Pflege und Wartung sind beim Elektromotor nicht erforderlich. Trotzdem müssen beim Betrieb des Elektromotors im Modell einige Dinge beachtet werden, die sich aus Funktion und Betriebsverhalten ergeben. Jedes bewegte Maschinenteil unterliegt einem mechanischen Verschleiß. Das gilt auch beim Gleichstrommotor. Seine Lebensdauer wird, sofern er nicht thermisch überlastet ist, von der Standzeit des Kommutators, der Kohlebürsten und der Lager bestimmt.

Über die thermische Belastung wurde bereits im Band 1 gesprochen. Der Motor kann unter Beachtung der dort erörterten Gesetzmäßigkeiten mit einer bestimmten Leistung belastet werden. Soll er mehr als seine Nennleistung für die vorgesehene Betriebsart abgeben, so muß auch die Kühlung entsprechend verbessert werden. Das gilt besonders für die im Modellinneren eingebauten Motoren, bei denen für die entsprechende Kühlluftführung, aber auch für den Kühlluftdurchsatz zu sorgen ist. Bei hochbelasteten Elektromotoren, ganz gleich, für welche Modellart, ist also ein entsprechender Kühllufteinund Kühlluftaustritt vorzusehen. Der Kühlluftdurchsatz wird in der Regel durch Eigenbelüftung, z. B. durch ein Lüfterrad auf der Motorwelle, erreicht. Soll mehr Kühlluft durch den Motor strömen, dann muß entweder die Motordrehzahl erhöht oder aber ein wirksamerer Lüfter angebaut werden.

Rezepte lassen sich hier nicht geben, da die Vielfalt der möglichen Lösungen zu groß ist. Auf jeden Fall kontrolliert man bei den ersten Betriebsversuchen mit dem Modell die Erwärmung des Motors und stellt auf diese Weise fest, ob die Kühlung ausreicht oder verbessert werden muß.

Ganz wesentlich wird vor allem bei nur im Teillastbereich betriebenen Elektromotoren die Lebensdauer von der Art und Qualität der Lagerung bestimmt. Da sie vom Nutzer kaum beeinflußt werden kann, muß er sich auf die sachgerechte Behandlung beschränken. Der Motor ist so im Modell einzubauen,

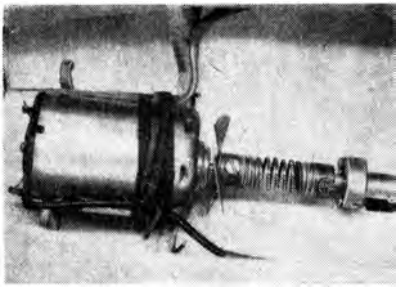


Bild 4.1
Einfache Federkupplung für ein kleines Schiffsmodell

daß auf die Lager keine unnötigen radialen oder axialen Kräfte wirken. Der Motor muß also zu den Kraftabtriebsorganen (Welle, Getriebe o. a.) präzise ausgerichtet sein. Die Kupplungen sollen zwar kraftschlüssig, möglichst aber nicht starr und formschlüssig sein. Das erreicht man durch den Einbau von Gummi- oder Federelementen in die Kupplung (Bild 4.2). Elastische Kupplungen haben außerdem den Vorteil, daß sie Unwuchtigkeiten vom Motor fernhalten.

Im Interesse einer langen Lebensdauer und optimaler Laufeigenschaften wuchtet man den Läufer des Motors bei der Her-

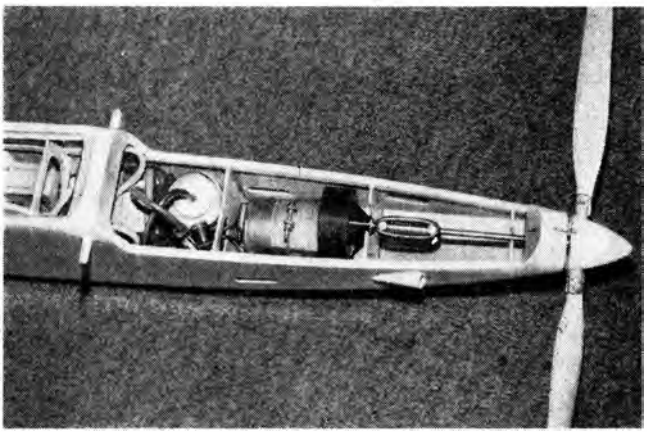


Bild 4.2 Elastische Gummikupplung im Elektroflugmodell

stellung aus. Wird der Läufer auf Grund irgendwelcher Einflüsse unwuchtig, so ist das mit den „Hausmitteln" des Modellbauers kaum zu beseitigen. Wenn es die Anschaffungskosten des Motors rechtfertigen, sollte man ihn zum Auswuchten an den Hersteller einsenden.

Die Bauteile mit dem erfahrungsgemäß stärksten Verschleiß sind Kommutator und Kohlebürsten. Sehr stark steigt der Verschleiß dieser Bauteile, wenn der Motor überlastet (Erwärmung, Bürstenfeuer) oder mit Überspannung (Bürstenfeuer) betrieben wird. Aber auch bei Betrieb mit Nennlast und Nennspannung unterliegen Kohlebürsten und Kommutator starken Abnutzungen. Bei der Herstellung wird zur Lamellenisolation eine Mikanitsorte ausgewählt, die etwa den gleichen Abrieb wie der Lamellenwerkstoff (meist Kupfer) hat. Damit ist gewährleistet, daß sich Lamellen und Isolation gleichmäßig abnutzen. Würden sich die Lamellen stärker abnutzen, so könnten die Kohlebürsten nicht mehr richtig auf ihnen liegen — sie begännen zu springen. Die Folge wäre verstärktes Bürstenfeuer und damit der schnelle Verschleiß des Kommutators.

Nach längerer Laufzeit nutzt sich der Kommutator ab; er wird unrund, hat Riefen, oder die Lamellenisolation steht über. Dann muß der Kommutator abgedreht und anschließend die Lauffläche der Bürsten geschlichtet werden. Da die Hersteller in Kleinmotoren zur Erzielung geringer Verluste und guter Laufeigenschaften Graphit- oder Metallgraphitbürsten verwenden, ist nach dem Überdrehen des Kommutators auf jeden Fall die Lamellenisolation zu vertiefen. Die Vertiefung soll 0,5 bis 0,8 mm betragen (Bild 4.3). Die Lamellenisolation wird dazu mit einer feinen Einstichsäge ausgekratzt. Diese Arbeit ist mit großer Sorgfalt zu verrichten, damit keine Isolationsreste an den Lamellenkanten stehenbleiben, aber auch die Oberfläche des Kommutators nicht beschädigt wird. Überstehende Isolationsreste würden infolge ihrer Härte zum Springen der Kohlebürsten führen und damit den Kontakt Kommutator — Kohlebürste stören. Die Folge wären Anbrennungen und schneller Verschleiß des Kommutators. Nach dem Vertiefen werden die Lamellenkanten angefast.

Im Bild 4.3 ist dargestellt, wie die Lamellenisolation richtig vertieft wird. Das dreieckige und das rechteckige Vertiefen der Lamellenisolation bewirken keinen sauberen Lauf der Kohle-

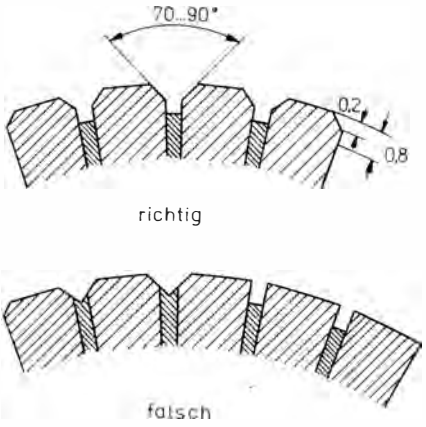


Bild 4.3 Vertiefen der Lamellenisolation

bürsten. Nach dem Vertiefen und Anfasen zieht man den Kommutator noch einmal mit Polierpapier ab.

Damit der Motor nach kurzer Einlaufzeit voll belastet werden kann, müssen Kommutator und Kohlebürsten einwandfreie Laufflächen haben. Zu diesem Zweck schleift man die Kohlebürsten ein (Bild 4.4). Je höher Drehzahl und Belastung des Motors sind, um so sorgfältiger muß das Einschleifen geschehen. Die Auflagefläche der Kohlebürsten wird mit einer Rundfeile und mit Schmirgelleinen der Rundung des Kommutators angepaßt. Danach zieht man einen Streifen feines Schmirgel-

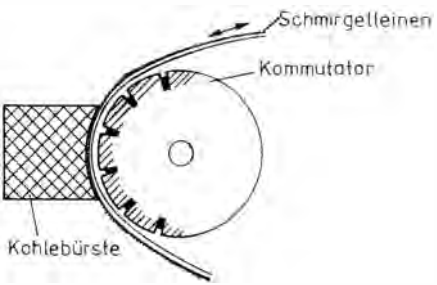


Bild 4.4 Einschleifen der Kohlebürsten

leinen so lange zwischen Kommutator und angedrückter Bürste hin und her, bis die Bürste auf der gesamten Fläche sauber aufliegt. Anschließend reinigt man Kommutator, Bürsten und Bürstenhalter gründlich vom Schleifstaub. Die Kohlebürsten werden dann in der gleichen Stellung wie beim Einschleifen eingebaut.

Nach dem Einschleifen läßt man den Motor, genau wie einen neuen Motor, etwa 2 Stunden bei halber Nennspannung im Leerlauf einlaufen. Der Motor ist eingelaufen, wenn sich auf dem Kommutator eine leichte Brünierung gebildet hat. Die Brünierung verringert die Reibung zwischen Kohlebürsten und Kommutator; sie ist daher für den einwandfreien Lauf der Kohlebürsten sehr wichtig. Je mehr Sorgfalt man auf das Einlaufen verwendet, um so höher wird der Wirkungsgrad, aber auch die Lebensdauer des Motors sein.

Muß man einen Motor mit neuen Kohlebürsten bestücken, dann richtet sich deren Auswahl nach den in Band 1 dargelegten Grundsätzen. Wählt man aus bestimmten Gründen eine härtere oder weichere Bürstensorte, so muß auch der richtige Bürstendruck neu ermittelt werden. In der Regel liegt der Bürsten-

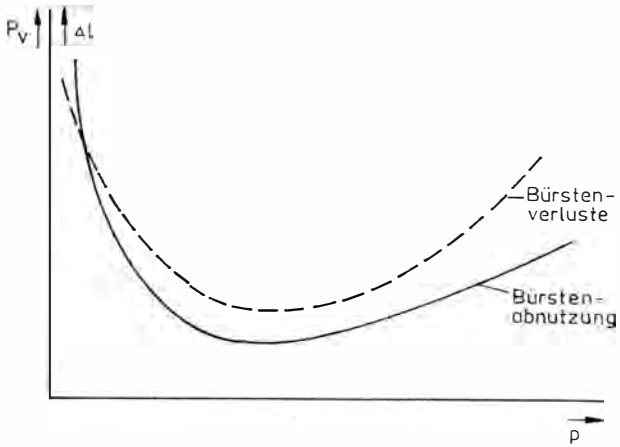


Bild 4.5 Abhängigkeit der Bürstenverluste P_V und der Bürstenabnutzung Δl vom Bürstendruck p

druck für Elektro- und Metallgraphitbürsten im Bereich von 2,0 bis 3,5 N · cm^{-2} (200 bis 350 p · cm^{-2}). Das können nur Richtwerte sein, da der optimale Wert von den konstruktiven Merkmalen des Motors, aber auch von der Belastung (Stromdichte, Spannung) und Umfangsgeschwindigkeit abhängt.

Es gibt einen mehr oder weniger breiten Bereich, in dem die Kohlebürsten ein gutes Laufverhalten aufweisen. Bei Verringerung des Bürstendrucks nehmen die Bürstenverluste und die Bürstenabnutzung durch Kontaktverschlechterung sehr stark zu (Bild 4.5). Bei erhöhtem Bürstendruck steigen die mechanischen Verluste und der mechanische Abrieb der Bürsten ebenfalls. Der optimale Wert des Bürstendrucks muß also durch Erprobung ermittelt werden. Das Andruckverhalten der Feder soll dabei so sein, daß bei abgenutzter Bürste noch 60% der richtigen Andruckkraft auftreten.

Auf die Problematik der Ankerrückwirkung und Bürstenverschiebung wurde bereits im Band 1 eingegangen. Soll ein Motor für eine andere Leistung oder Drehrichtung optimal angepaßt werden, dann kann das neue Einstellen der neutralen Zone erforderlich sein. Zur Kompensation der Ankerrückwirkung dreht man die Bürstenbrücke je nach Belastung um 10 bis 15° entgegen der Drehrichtung des Ankers. Am besten läßt sich das auf dem Bremsprüfstand durchführen; dort kann man eine genau definierte Belastung vorgeben und die Bürstenverschiebung auf besten Wirkungsgrad und einwandfreie Stromwendung einstellen.

In diesem Zusammenhang sind noch einige Bemerkungen zur Belastung des Motors wichtig. Aus den bisherigen Darlegungen, besonders in Band 1, geht hervor, daß die Lebensdauer des Motors bei Überlast rapide abnimmt und durch verschlechterte Kommutierung die Störungen der Fernsteueranlage wachsen. Man sollte den Motor daher nur mit der Last betreiben, für die er konstruiert wurde, d. h., Strom, Spannung und Drehzahl müssen etwa den Angaben im Datenblatt oder den auf dem Prüfstand ermittelten Werten entsprechen.

Eine Leistungssteigerung ist in gewissen Grenzen, unter Inkaufnahme der damit verbundenen Nachteile, durch den Betrieb bei höherer Klemmenspannung möglich. Dabei müssen aber Klemmenspannung *und* Drehzahl erhöht werden. Erhöht man nur die Klemmenspannung und vergrößert durch Konstanthalten der Drehzahl den Ankerstrom, dann führt das nicht nur zu erhöhten

Verlusten und schlechterer Kommutierung, die thermische Belastung der Ankerwicklung hat dann auch schnell die zulässige Grenze überschritten. Aus den Motorkennlinien (Band 1) ist zu ersehen, daß das Leistungsmaximum bei höherer Klemmenspannung und höherer Drehzahl liegt. Die Leistungssteigerung ergibt sich also aus der höheren Drehzahl und nicht aus dem höheren Drehmoment. Das bedeutet für den Modellbetrieb, daß die Schraubenauswahl dieser Bedingung angepaßt werden muß.
Auf keinen Fall ist eine Leistungssteigerung über vergrößerte Schrauben bei gleichbleibender Klemmenspannung zu erzielen. Durch die vergrößerte Schraube wächst das Lastmoment, damit verschiebt sich der Arbeitspunkt auf den Kennlinien in ungünstigere Bereiche (Drehzahl zu gering, Strom zu hoch, dadurch unzulässige Erwärmung und verschlechterter Wirkungsgrad). Für den Modellbetrieb ergeben sich daraus folgende Regeln:

— Elektromotoren für Dauerbelastung können ohne Nachteile bis zum 1,5fachen der Nennspannung (150 %) betrieben werden.
— Bei erhöhter Belastung müssen Klemmenspannung und Drehzahl steigen.
— Bei erhöhter Belastung sind zusätzliche Maßnahmen für eine ausreichende Kühlung des Motors zu treffen.
  Am stärksten erwärmen sich Bürsten, Kommutator und Wicklung.
— Eine gute Luftkühlung dieser Bauteile hat sich als am wirksamsten erwiesen. Da der Lüfter auf der Welle angebracht ist bzw. der Luftschraubenstrahl zur Kühlung verwendet wird, sollte deshalb auch auf die der Spannung angepaßte Drehzahl geachtet werden.
— Sofern möglich, kontrolliert man im Modell bei den Versuchen zur Leistungssteigerung Stromaufnahme, Erwärmung und Kommutierung. Vorher sollten auf dem Prüfstand die Grenzwerte ermittelt werden.
— Eine erhöhte Belastung erfordert in der Regel zusätzliche Entstörmaßnahmen.
  Bei einigen Motoren ist bereits der rasch wachsende Störpegel, der selbst durch aufwendige Entstörmaßnahmen nicht gesenkt werden kann, die „Belastungsgrenze".
— Die Leistungssteigerung hat dort ihre Grenze, wo bei vollgeladener Fahrbatterie die Funktionssicherheit der Fernsteueranlage im Reichweitebereich nicht mehr gegeben ist.

— Motoren für Kurzzeitbelastung (E-Flugmotoren) sind nur bedingt überlastbar. Da die Überlastung dieser Motoren die Lebensdauer rapide verkürzt, sollte man möglichst darauf verzichten und einen leistungsstärkeren Motor verwenden.
— Wird der Motor für Kurzzeitbelastung trotzdem mit erhöhter Nennlast betrieben, so ist auf die Beachtung der vorgenannten Punkte (erhöhte Drehzahl, Anpassung der Schraube, verbesserte Kühlung, Überwachung des Laststroms, der Erwärmung und der Kommutierung) besonderer Wert zu legen.

Da es sich bei der Auslegung und dem Betrieb eines Modellantriebs um recht komplexe Zusammenhänge handelt, können nur Hinweise und keine Rezepte gegeben werden. Die Optimierung eines Antriebs ist eine interessante Sache, die der Amateur mit einfachen Mitteln und der nötigen Sachkenntnis durchaus selbst ausführen kann.

Nach einer gewissen Betriebszeit werden Störungen am Motor sicher nicht ausbleiben. Mit den vermittelten Kenntnissen lassen sich jedoch die auftretenden Fehler finden.

Die folgende Übersicht kann dabei eine wesentliche Hilfe sein (entnommen aus [3], S. 24/25):

Störfaktoren und Abhilfe

Kohlebürsten sind Verschleißteile der elektrischen Maschinen. Sie unterliegen einer Abnutzung. Die Höhe dieser Abnutzung ist von der Höhe der Beanspruchung der Kohlebürsten wie Stromdichte, Umfangsgeschwindigkeit und Kommutierungsverhalten der Maschine abhängig. Bei Verwendung zweckentsprechender Kohlebürsten, bei sorgfältigem Einbau und Einlauf derselben sowie einwandfreiem Zustand der Maschinen ist über längere Zeit ein zufriedenstellender Betrieb und eine geringe Bürstenabnutzung zu erwarten.

Die Kohlebürsten sollen bereits nach einigen Stunden Laufzeit eine durchgehende dünne Brünierungsschicht (Patina) auf dem Kommutator oder Schleifring bilden. Nach längerer Betriebszeit kann diese Brünierungsschicht je nach verwendeter Bürstenmarke, Stromdichte und nach äußeren Einflußfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Staub oder Öl mehr oder weniger stark anwachsen. Die Farbe dieser Schicht kann hellbraun über blau bis schwarz sein. Die Schicht kann blank oder seidenmatt, gleichmäßig oder gestreift sein. Der Zustand dieser Schicht ist sehr wesentlich für den einwandfreien Lauf der Kohlebürsten.

Abweichungen von diesem Zustand sind ein Anzeichen für auftretende Störungen des Betriebs. Die Laufflächen der Kohlebürsten sollen ebenfalls glatt und blank bis seidenmatt sein. Bei einzelnen Kleinmotoren ist ein leichtes Anflecken bzw. Mattwerden der ablaufenden Bürstenkante bis maximal 1/3 der Lauffläche nicht zu vermeiden ...

Treten bei Kleinmotoren Störungen im Laufverhalten der Kohlebürsten auf, so können für jede Störungserscheinung mehrere voneinander unabhängige oder abhängige Ursachen in Frage kommen. Die bei Kleinmotoren am häufigsten auftretenden Störungen und deren hauptsächlichste Ursachen sind in der nachfolgenden Übersicht aufgeführt:

Störung	**Ursachen**
Starkes Bürstenfeuer	Zu niedriger Bürstendruck, falsche Stellung der Bürstenhalter, ungenügendes Einschleifen der Kohlebürsten, Verklemmen der Kohlebürsten im Halter, unruhiger Lauf des Kommutators durch Unwucht, Lagerfehler oder Schwingungen im Antrieb, Schlag des Kommutators, Hervorstehen einzelner Kommutatorlamellen oder der Lamellenisolation
Schwingen oder Klappern der Kohlebürsten im Halter, eventuelles Ausbrechen der Kohlebürsten	Zu großes Spiel zwischen Kohlebürste und Bürstenhalter, zu großer Abstand zwischen Bürstenhalter und Kommutator, zu geringer Bürstendruck, unruhiger Lauf des Kommutators, hervorstehende Lamellen oder Lamellenisolation
Anbrennung einzelner Kommutatorlamellen und Abflachung des Kommutators	Schlechte Verbindung zwischen Wicklung und Kommutator, Windungsschluß in den Ankerspulen, unruhiger Lauf des Kommutators, hervorstehende Lamellen bzw. Lamellenisolation
Zu hohe Erwärmung des Kommutators, eventuelles Auslöten der Wicklung	Zu hohe mechanische Bürstenverluste durch zu hohen Bürstendruck, zu geringe Stromdichte oder ungeeignete Bürstenmarken, zu hohe elektrische Bürstenverluste durch zu geringen Bürstendruck, zu hohe Stromdichte, Festklemmen der Kohlebürste im Halter, hervorstehende Lamellenisolation oder unruhiger Lauf des Kommutators
Starke Schwärzung oder Anbrennung des Kommutators	Zu hohe Stromdichte in den Kohlebürsten, hervorstehende Lamellenisolation, unruhiger oder unrunder Lauf des Kommutators, Festhängen der Kohlebürsten im Halter, ungenügender Bürstendruck, Niederschlag von Lageröl auf den Laufflächen, eventuell Bürstenmarke mit zu geringem Putzvermögen
Blanker, unbräunierter Kommutator mit Riefenbildung	Zu niedrige Stromdichte in den Kohlebürsten und dadurch erhöhte Bürstenreibung, zu hoher Bürstendruck, Staub zwischen Bürstenlauffläche und Kommutator, eventuell Bürstenmarke mit zu hohem Putzvermögen

Wenn Modellbauer fachsimpeln, dann geht es oft auch um die Leistung des Antriebsmotors, um Leistungssteigerung oder Ge-

wichtsverminderung. Aus den bisherigen Darlegungen wird aber auch klar, daß bei einem gegebenen Elektromotor für Leistungssteigerung oder gar Gewichtsverminderung recht enge Grenzen gesetzt sind. Der Konstrukteur hat die ihm von Material, Technologie und Preis gegebenen Möglichkeiten schon so ausgenutzt, daß der Modellbauer kaum etwas verbessern kann. Will man also aus einem vorhandenen Elektromotor mehr Leistung herausholen, als für ihn laut Konstruktion vorgesehen ist, so geht das nur auf Kosten der Lebensdauer; entweder wird die Wicklung thermisch überlastet (die Isolation verschmort), oder der Kommutator verbrennt vorzeitig.

Das einzige, das man am Motor ändern kann, ohne solche wichtigen Kennwerte wie Lebensdauer, abgegebene Leistung, Wirkungsgrad und Qualität der Stromwendung nachteilig zu beeinflussen, ist das Umwickeln auf eine andere Betriebsspannung. Da das aber einige Kenntnisse und auch handwerkliche Fertigkeiten erfordert, sollte sich der Modellbauer zunächst genau überlegen, ob es überhaupt notwendig ist und welche Vorteile er dadurch erlangt. Ist das Umwickeln aus bestimmten Gründen erforderlich, so überläßt man es besser einer Werkstatt. Man muß sich außerdem darüber klar sein, daß das Um- oder auch Neuwickeln unter Umständen teurer ist als ein neuer Motor.

Will sich ein Modellbauer aus diesen oder jenen Gründen selbst mit dem Umwickeln des Ankers befassen, dann sollte er sich zunächst die Arbeit in einer Ankerwickelei ansehen und sich dabei über die wichtigsten Arbeitsschritte bei der Herstellung von Wicklungen informieren. Vielleicht kann er bei dieser Gelegenheit auch gleich den für die eigenen Wickelarbeiten benötigten Kupferlackdraht erwerben.

Die Arbeitsgänge im einzelnen zu erläutern würde den Rahmen dieser Broschüre übersteigen. Deshalb nur so viel: Bevor die alte Wicklung vom Anker entfernt wird, nimmt man das Wikkelschema ab und zeichnet es sich genau auf. Dann entfernt man die Wickelköpfe (absägen oder abmeißeln) und zählt genau die Windungen in einer Nut. Von einem Drahtstückchen wird durch vorsichtiges Abkratzen die Isolation entfernt und genau der Durchmesser D_1 gemessen. Daraus berechnet man nach

$$q_{\Delta 1} = \frac{\pi D_1^2}{4} \qquad (10)$$

den Querschnitt q_{A1} des alten Ankerleiters. Nach der Gleichung

$$q_{A2} = q_{A1} \cdot \frac{U_1}{U_2}, \tag{11}$$

mit q_{A2} — Querschnitt des neuen Ankerleiters, q_{A1} — Querschnitt des alten Ankerleiters, U_1 — alte Nennspannung, U_2 — neue Nennspannung,
ermittelt man dann den Querschnitt des Ankerleiters für die neue Betriebsspannung U_2. Die neue Windungszahl N_2 ergibt sich aus der Gleichung

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}, \tag{12}$$

mit N_2 — neue Windungszahl, N_1 — alte Windungszahl.
Der Kommutator ist vom Konstrukteur für eine bestimmte Strombelastung ausgelegt. Wenn man nun einen Anker für eine geringere Spannung umwickelt, so steigt bei gleicher Nennleistung der aufgenommene Strom und damit die Kommutatorbelastung, wodurch wiederum die Lebensdauer verkürzt wird. Noch eine Bemerkung zur Gewichtsverminderung des Elektromotors. Der Konstrukteur wird aus ökonomischen Gründen den Motor materialsparend auslegen. Will man doch noch „Gewicht machen", dann kann es nur auf Kosten der Lagerschilde (verringert die Festigkeit) oder auf Kosten des magnetischen Kreises [verringert nach Gl. (2) das Drehmoment] geschehen. An beidem wird aber keinem Modellbauer gelegen sein. Vor allem sei aber vor Manipulationen am magnetischen Kreis gewarnt. Meist führt das zu Verschlechterungen statt zu Verbesserungen. Die einzig sinnvolle Maßnahme wäre nach Gl. (2) die Verringerung des Luftspalts, aber gerade dafür bieten moderne Kleinmotoren mit ringförmigen Permanentmagneten keine Möglichkeit.

5. Motorprüfstand

Da der Amateur beim Erwerb eines Elektromotors selten Datenblätter oder gar Kennlinien erhält, diese Daten für den richtigen Einsatz des Motors aber unerläßlich sind, ist er gezwungen, sie selbst zu ermitteln.

Der Motorprüfstand ist so entworfen, daß man auch Motoren mit völlig unbekannten Daten untersuchen, die Kennwerte bestimmen und Kennlinien gewinnen kann.

Liegt ein völlig unbekannter Motor ohne Typenschild vor, der aber in Abmessungen und Gewicht geeignet erscheint, so muß man zunächst die Motorart feststellen. Für Modellantriebe werden in der Regel Gleichstrommotoren mit Permanentmagneten, seltener mit Erregerspulen verwendet. Den Gleichstrommotor erkennt man am vorhandenen Kommutator und an den Kohlebürsten. Ein Permanentmagnet ist eingebaut, wenn das Gehäuse Eisenteile (Schraubenzieher, Nägel u. ä.) anzieht.

Hat der Motor eine Feldwicklung, dann muß die Schaltungsart bestimmt werden. Die Nebenschlußwicklung ist parallel zu den Bürsten geschaltet; sie besteht aus vielen Windungen aus dünnem Draht. Die Hauptschlußwicklung ist in Reihe zu den Bürsten geschaltet, sie besteht aus vielen Windungen aus dickem Draht, da sie vom Ankerstrom durchflossen wird.

Bei geteilten Feldwicklungen bzw. bei Feldwicklungen mit Anzapfungen muß man besonders aufpassen. Durch Widerstandsmessung zwischen den Bürstenanschlüssen und den herausgeführten Spulenanschlüssen läßt sich die Schaltung der Erregerwicklung ermitteln.

Am Schluß dieser äußerlichen Untersuchung sieht man sich den Kommutator und die Ankerwicklung genauer an. Hat der Kommutator viele Lamellen (meist mehr als 7) und besteht die Ankerwicklung aus vielen dünnen Drähten (0,2 bis 0,3 mm Durchmesser), so handelt es sich in der Regel um einen Gleichstrommotor für höhere Spannungen ($U_{nenn} > 24$ V). Es kann sogar ein Universalmotor sein, der für Gleich- und Wechselspannung gleichermaßen geeignet ist. Solche Motoren werden in Haushaltsgeräten (Mixgerät, Staubsauger, Kaffeemühle u. a.)

und in Elektrowerkzeugen (Handbohrmaschine, Elektroschrauber u. a.) eingesetzt. Sie sind für den Modellantrieb wegen der hohen Klemmenspannung ungeeignet.

Nach der „Besichtigung" des Motors folgt die Untersuchung auf dem Prüfstand. Durch die Belastung des Motors auf dem Prüfstand kann man sein Betriebsverhalten genau ermitteln. Dabei werden alle wichtigen Werte gemessen, in eine Meßtabelle eingetragen und anschließend die Motorkennlinien gezeichnet. Den Elektromotor kann man auf dem Prüfstand mechanisch oder elektrisch abbremsen. Zu den mechanischen Verfahren zählen die Seilbremse sowie der Pronysche Zaum, zu den elektrischen Verfahren die Wirbelstrombremse, der Pendelgenerator oder der geeichte Bremsgenerator. Ausreichend genaue Ergebnisse mit einfachen Mitteln erzielt man mit der Seilbremse. Da dieser Bremsprüfstand mit Geräten aus der Lehrmittelsammlung einer Oberschule aufzubauen ist (Bild 5.1), soll er im folgenden beschrieben werden. Wer allerdings des öfteren Kennlinien aufzunehmen hat, der kann sich einen Seilbremsprüfstand auch mit einfachen Mitteln in seiner Modellwerkstatt aufbauen.

Auf der Motorwelle ist die Bremsscheibe befestigt, um die das Bremsseil gelegt wird (Bild 5.2). Damit das Seil nicht von der Scheibe rutscht, läuft es in einer Nut. Der Motor wird belastet,

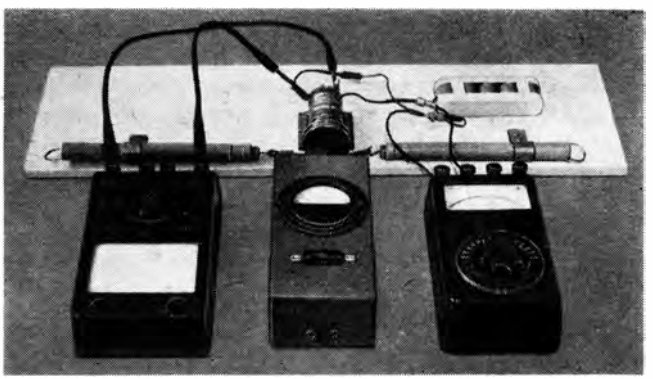


Bild 5.1 Motorprüfstand mit Seilbremse

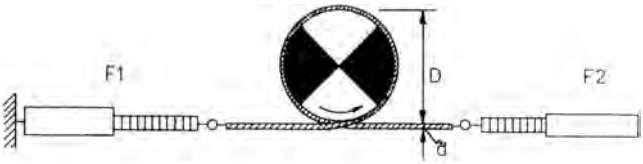


Bild 5.2 Prinzipdarstellung der Seilbremse

indem man die Zugkraft der Federkraftmesser erhöht. Das Motordrehmoment berechnet sich nach der Gleichung

$$M_{\text{mot}} = \frac{1}{2}(F_1 - F_2)\,(D - d), \tag{13}$$

mit M_{mot} – Motordrehmoment in Nm, F_1 – größere Zugkraft in N, F_2 – kleinere Zugkraft in N (je nach Drehrichtung), D – Durchmesser der Bremsscheibe in m, d – Durchmesser des Bremsseils in m.

Verwendet man als Bremsseil einen dünnen festen Bindfaden, so kann man d in erster Näherung zu $d = 0$ vereinfachen.

Weiter kann vereinfacht werden:

$$F_{\text{res}} = F_1 - F_2, \tag{14}$$

so daß man zur Drehmomentberechnung erhält:

$$M_{\text{mot}} = \frac{1}{2} F_{\text{res}}\, D. \tag{15}$$

Beim Betrieb einer solchen Seilbremse ist noch folgendes zu beachten:

- Es werden nur eingelaufene Motoren abgebremst. Als eingelaufen kann ein Motor angesehen werden, der bei 50 bis 70% der Nennspannung 2 Stunden im Leerlauf betrieben wurde.
- Bei größeren abgebremsten Leistungen als $P_{\text{ab}} = 10$ W und bei Dauerversuchen erwärmt sich die Bremsscheibe erheblich. Für solche Versuche dreht man die Scheibe innen aus und füllt während des Meßvorgangs mit einer Spritzflasche (Ölkanne o. ä.) in die innere Nut etwas Wasser zur Kühlung. Das Wasser verdampft, und die Bremsscheibe kann sich nicht über + 100 °C erhitzen (Bild 5.3).

Ein besonderes Problem bei der Belastungsprüfung von Klein- und Kleinstmotoren ist die Drehzahlmessung. Jede mechanische

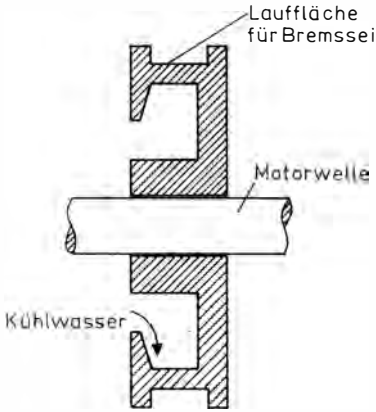


Bild 5.3
Schnitt durch die Bremsscheibe

Drehzahlmessung, zumindest die Verfahren, die mit den Mitteln einer Lehrmittelsammlung zu realisieren sind, sind mit einer Belastung des Motors verbunden. Diese verfälscht das Meßergebnis für das Drehmoment um so mehr, je höher der Leistungsbedarf des Drehzahlmessers und je kleiner die Wellenleistung des Motors ist. Mechanische Drehzahlmeßverfahren scheiden daher aus.

Bei dem beschriebenen Prüfstand wird eine kontaktlose (optoelektronische) Drehzahlmeßmethode angewendet. Zu diesem Zweck sind auf der Bremsscheibe 2 schwarze und 2 weiße Felder angebracht. Bei Drehung der Scheibe erzeugen diese Felder Helligkeitsschwankungen, deren Frequenz der Drehzahl direkt proportional ist. Die Helligkeitsschwankungen werden durch einen Fotowiderstand in elektrische Impulse umgewandelt und gezählt. Zur Drehzahlmessung diente ein Gerät, das ursprünglich für kontaktlose Drehzahlmessungen bei Flugmodellen entwickelt worden war. Funktions- und Baubeschreibung sind in Abschnitt 9.1. zusammengefaßt.

Wenn der Motorprüfstand entsprechend Bild 5.4 aufgebaut ist, kann mit den Bremsversuchen begonnen werden. Handelt es sich um einen unbekannten Motor, so betreibt man ihn zunächst im Leerlauf. Dabei steigert man die Klemmenspannung von 2 V in Schritten von 2 bis 24 V und kontrolliert dabei Drehzahl, Stromaufnahme und Kommutierungsverhalten. Ähnlich

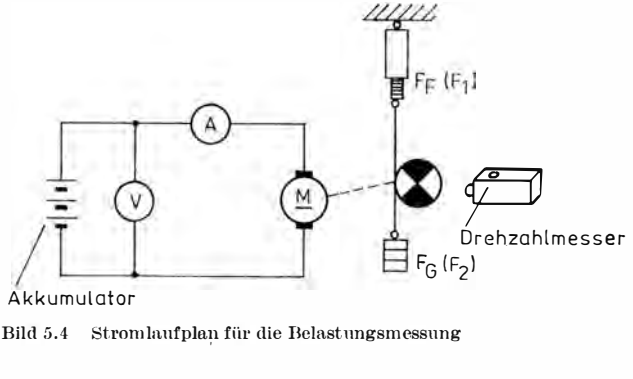


Bild 5.4 Stromlaufplan für die Belastungsmessung

wird mit Motoren, deren Klemmenspannung bekannt ist, verfahren. Im Leerlauf steigert man die Klemmenspannung von 50% ($0{,}5 \cdot U$) bis auf 200% ($2 \cdot U$) und beobachtet ebenfalls Stromaufnahme, Drehzahl und Kommutierung.

Im zweiten Versuch belastet man den Motor probeweise mit verschiedenen Drehmomenten und bremst ihn bei 50% und 100% der Nennspannung bis auf die halbe Leerlaufdrehzahl ab. Dabei werden wieder Stromaufnahme, Drehzahl und Kommutierung beobachtet. Tritt starkes Bürstenfeuer auf, so ist die Belastung nicht weiterzusteigern. Den Belastungspunkt, an dem starkes Bürstenfeuer einsetzt, merkt man sich.

Sind die ersten Belastungsversuche zufriedenstellend verlaufen, so wird eine Meßreihe bei U_{nenn} durchgeführt. Zu diesem Zweck legt man sich eine Meßtabelle an (Tabelle 5.1.). Die Maxima für Stromaufnahme und Kraft sind von den vorhergehenden Belastungsversuchen bekannt. Maximum für die Drehzahl ist die Leerlaufdrehzahl, Minimum für den Strom der Leerlaufstrom. Da M_{mot} nach Gl. (15) berechnet wird, teilt man den Wertebereich für F_{res} von Null bis zum Maximum in etwa 8 bis 10 gleiche Schritte. Diese Belastungswerte werden dann im Meßversuch durch Spannen der Federkraftmesser eingestellt. Im Meßversuch steigert man die Belastung vom Leerlauf bis zum Maximalwert für F_{res} und trägt die gemessenen Werte für F_1, F_2, U, I und n in den Spalten 1 bis 5 der Meßtabelle ein. Aus den Meßwerten werden nach den angegebenen Gleichungen M_{mot}, P_{zu}, P_{ab} und η berechnet. Die Werte für M_{mot} nach

Tabelle 5.1. Muster der Meßtabelle

	gemessene Werte					errechnete Werte			
Nr.	F_1	F_2	U	I	n	M	P_{zu}	P_{ab}	η
	N	N	V	A	min^{-1}	Nm	W	W	%
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									

Parameter: Klemmenspannung U in V
Durchmesser der Bremsscheibe D in mm
Durchmesser des Bremsseils d in mm
Leerlaufstrom I_{leer} in A
Leerlaufdrehzahl n_{leer} in min^{-1}
Motor-Nr. — Typ

Gl. (14), P_{zu} nach Gl. (6), P_{ab} nach Gl. (8) — Band 1 — und η nach Gl. (11) — Band 1 — trägt man in Abhängigkeit vom Drehmoment M in einem Diagramm ähnlich den Motorkennlinien (Band 1) ein. Um die Kennlinien nicht zu weit auseinanderzuziehen, wurde für P_{zu} und P_{ab} eine unterschiedliche Ordinatenteilung verwendet.

Für die Durchführung des Belastungsversuchs gibt es 2 Varianten. Bei der einen Variante benutzt man eine stabile Spannungsquelle, z. B. ein Netzgerät mit geringem Innenwiderstand oder einen Akkumulator hoher Kapazität (Pkw-Akkumulator o. ä.). In diesem Fall ändert sich die Klemmenspannung U mit steigender Belastung nicht, wenn kurze Verbindungsleitungen mit ausreichendem Querschnitt verwendet werden. Dann ist das Verhalten des Motors praktisch unabhängig von der Spannungsquelle, und man erhält gewissermaßen „seine" Kennlinie. Bei der zweiten Variante benutzt man als Spannungsquelle die — voll geladene — Antriebsbatterie des Modells. Da diese Batterien (Akkumulatoren) aus verschiedenen Gründen nur eine begrenzte Kapazität haben, wird die Klemmenspannung während des Belastungsversuchs sinken. Das kann auf den Innenwiderstand der Spannungsquelle oder auf nachlassende Kapazität,

die letztlich auch eine Innenwiderstandserhöhung zur Folge hat, zurückzuführen sein. (Auf die genaue Wechselwirkung zwischen Spannungsquelle und Motor wurde im Abschnitt 2. eingegangen.) An dieser Stelle ist zunächst die Kenntnis dieses Verhaltens wichtig, da die sinkende Klemmenspannung auch eine Rückwirkung auf das Verhalten der anderen Motorenkennwerte hat. Um diese Rückwirkung besser einschätzen zu können, führt man noch 2 weitere Belastungsversuche für $0{,}75 \cdot U$ und $1{,}5 \cdot U$ durch. Der Vergleich der Belastungskurven für die verschiedenen Klemmenspannungen läßt dann wichtige Rückschlüsse für das Betriebsverhalten des Motors im praktischen Betrieb zu.

Bei diesen Belastungsversuchen sollte man schon im Interesse einer geringen Erwärmung der Bremsscheibe nur kurzzeitige Belastungen anstreben. Für die Kennlinienaufnahme reicht das völlig aus.

Nach diesen Kurzzeitbelastungen empfiehlt sich aber auch ein Dauerbelastungsversuch, bei dem die Erwärmung des Motors für die verschiedenen Belastungsfälle untersucht wird. Eine Erwärmung des Motors auf $+40$ °C bis $+60$ °C ist zulässig. Der Motor soll dabei ähnlich wie im Modell gekühlt werden (eventuell Kühlpropeller verwenden).

6. Antrieb der Modelle

Die Anforderungen an den Antrieb der Modelle sind sehr unterschiedlich. Bei dem einen Modell steht das möglichst stufenlose Drehzahlstellen, beim anderen die Höchstleistung im Vordergrund. In allen Fällen aber müssen Motor und Antrieb einander angepaßt sein, um optimale Leistungen zu erzielen. Beim Motor wird man versuchen, den Arbeitspunkt im Kennlinienfeld möglichst in den Bereich zwischen Wirkungsgrad- und Leistungsmaximum zu legen (s. Band 1).
Die Lage des Arbeitspunkts wird durch den Schnittpunkt der Motor- mit der Arbeitskennlinie fixiert. Als Arbeitskennlinie sei das Drehzahl-Drehmoment-Verhalten des Modellantriebs verstanden. Ein Modellauto hat bei gleichbleibender Geschwindigkeit unter Vernachlässigung des Luftwiderstands (bei kleinen Geschwindigkeiten zulässig) eine Kennlinie mit der Steigung 1 (Kennlinie 1 in Bild 6.1).

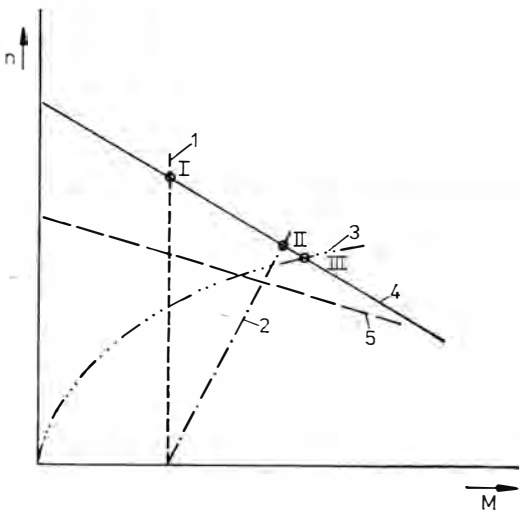


Bild 6.1 Arbeitskennlinien verschiedener Antriebe

Dem Befahren einer etwa gegebenen Steigung entspricht Kennlinie 2. Bei höheren Geschwindigkeiten wird dann der Luftwiderstand wirksam. Der Propellerantrieb (Schiffs- oder Flugmodell) hat eine annähernd quadratische Kennlinie (Kennlinie 3 in Bild 6.1). Jeweils der Schnittpunkt (I, II und III) von Motor- und Arbeitskennlinie, also der Arbeitspunkt, legt die Drehzahl des Antriebs fest. Entnimmt man aus dem Kennlinienfeld des Motors, daß der Arbeitspunkt ungünstig zum Wirkungsgrad oder zur abgegebenen Leistung liegt, so muß er verschoben bzw. der Motor dem Antrieb angepaßt werden. Man kann die $[n = f(M)]$-Kennlinie eines Motors über ein Getriebe gewissermaßen transformieren und damit die Anpassung erreichen. Durch ein Getriebe mit der Untersetzung 2:1 würde die Drehzahl halbiert, das Drehmoment aber verdoppelt (Kennlinie 5 in Bild 6.1).
Nach Gleichung

$$n_2 = \frac{M_1}{M_2} \cdot n_1, \tag{16}$$

mit n_2 — Getriebedrehzahl, n_1 — Motordrehzahl, M_1 — Motordrehmoment, M_2 — Getriebedrehmoment,
kann man die für den jeweiligen Antrieb erforderliche Übersetzung berechnen. Getriebe werden zur Anpassung von Antrieb und Motor bei allen 3 Modellarten angewendet.
Den rechten Reiz bietet das ferngesteuerte Modell in den meisten Fällen erst, wenn man die Funktionstüchtigkeit und die Leistung sowie das Können des Erbauers im sportlichen Wettstreit mit anderen Gleichgesinnten messen kann. Im folgenden wird daher auf einige Probleme ferngesteuerter Modelle der verschiedenen Sportklassen hingewiesen.
Für funkferngesteuerte Automodelle, Fachbezeichnung „RC-Cars", gibt es die Klassen
— vorbildgetreue Modelle,
— freie Konstruktionen,
— Funktionsmodelle
für Rad- und Kettenfahrzeuge in den Maßstäben von 1:8 bis 1:25. Die Klassenbestimmungen sind in den Bauvorschriften und Wettkampfregeln für den Automodellsport, herausgegeben vom Automodellsportklub der DDR, nachzulesen. Im Wettkampf werden die Bauausführung und das Befahren eines Kurses (Fahr-

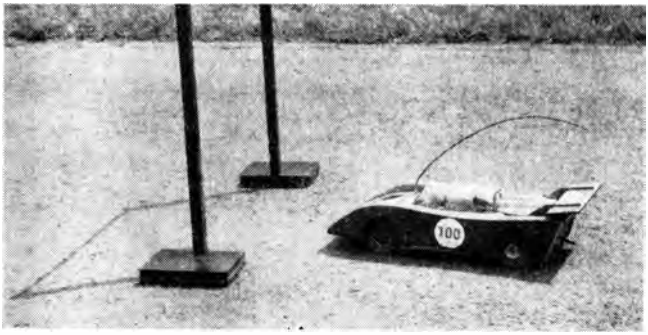


Bild 6.2 Automodell auf der Wettkampfstrecke

schul-, Slalom- oder Hindernisstrecke) bewertet (Bild 6.2). Mit dem Fahrtregler der Proportionalfernsteuerung und einem leistungsfähigen Elektromotor lassen sich fast alle Antriebsprobleme lösen. Da man mit dem Fahrtregler auch stufenlos rückwärts fahren kann, ist dieser „Rückwärtsgang" gleich als hochwirksame Bremse verwendbar. Allerdings muß beim Einbau von Fahrtregler und Motor für ausreichende Kühlung gesorgt werden. Wählt man ein Modell mit dem Maßstab 1:8 (Radstand 300 mm, Spurbreite max. 270 mm), so ist auch genügend Raum im Modell, um Batterien mit ausreichender Kapazität für längere Fahrzeiten unterzubringen. Nicht minder reizvoll sind für den Modellbauer die „Oldtimer", die man mit dem Elektroantrieb vorbildgetreu antreiben und fernsteuern kann. Ähnlich wie bei den Automodellen macht auch bei den Schiffsmodellbauern erst das Kräftemessen im sportlichen Wettstreit den eigentlichen Reiz der Sache aus. In diesem Zusammenhang sind die Schiffsmodellklassen mit Elektroantrieb von besonderem Interesse. Die Klassenbestimmungen für den Schiffsmodellsport werden von der „NAVIGA", der europäischen Vereinigung für Schiffsmodellbau und Schiffsmodellsport, der auch der Schiffsmodellsportklub der DDR angehört, herausgegeben. Die Schiffsmodelle sind in Klassen für

— vorbildgetreue Fahrmodelle,
— ferngesteuerte Geschwindigkeitsmodelle,
— ferngesteuerte vorbildgetreue Modelle

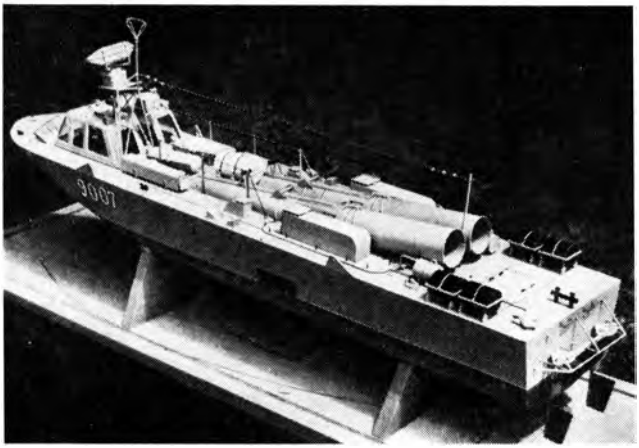
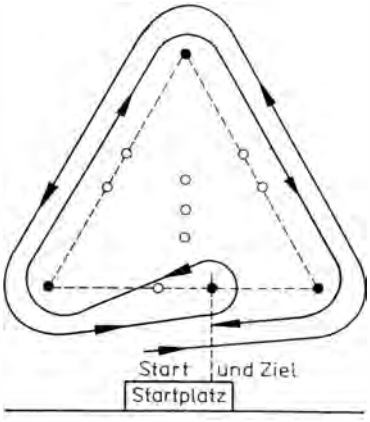


Bild 6.3 Modell der Klasse F2 — B;
LTS der Volksmarine der DDR (leichtes Torpedoschnellboot)

eingeteilt. Bei den vorbildgetreuen Modellen kommt es auf das kleinste Detail an, und der Modellbauer kann in der maßstabgerechten Nachbildung seine ganze Liebe und sein Können beweisen (Bild 6.3). Hinzu kommt die Beherrschung der Fahr- und Steuerungstechnik, denn erst die Baubewertung und die Fahrwertung bilden das Gesamtergebnis. Bei den Geschwindig-



b)

Bild 6.4
Klasse F1 — E 1 kg;
a — Modell,
b — Wettkampfkurs
F1 — E (Seitenlänge des Kursdreiecks = 30 m)

keitsmodellen wird dagegen nur die Fahrt entweder nach Zeit oder/und Fehlerpunkten gewertet. Diese Modelle sind reine Zweckkonstruktionen (Bild 6.4). Das Modell nach Bild 6.4a erreicht Fahrzeiten von 20 bis 30 s für einen Wertungslauf auf dem Wettkampfkurs (Bild 6.4b).
Bild 6.5 zeigt eine vorbildgetreue Motorjacht.
Mit der Entwicklung preiswerter und hochbelastbarer Elek-

Bild 6.5 Vorbildgetreue Motorjacht

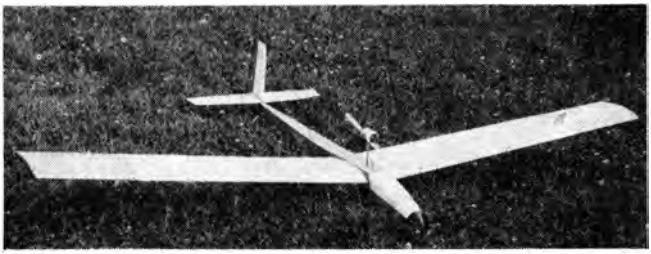


Bild 6.6 Elektroflugmodell (Konstruktion und Bau *L. Schramm*)

trokleinmotoren und Akkumulatoren erhielten die Modellbauer das Material in die Hand, mit dem sie eine langgehegte Idee verwirklichen konnten — den Elektroflug. Es lag in der Natur der Sache, daß die ersten Elektroflugmodelle sehr leicht, aber fest gebaute Thermiksegler waren, die mit 1 oder 2 starken Kleinmotoren für einen Steigflug von etwa 10 min angetrieben wurden. Bei dem Modell nach Bild 6.6 (Eigenkonstruktion von *L. Schramm*) ist der Elektromotor auf einem Träger (Pylon) im Schwerpunkt befestigt. Dieses Modell, ausgerüstet mit Silber-Zink-Akkumulatoren, flog erstmalig im Herbst 1973. Bei anderen Konstruktionen werden 2 Motoren mit Getriebe und Klappluftschraube rechts und links neben dem Rumpf an der Tragflächenhinterkante befestigt.

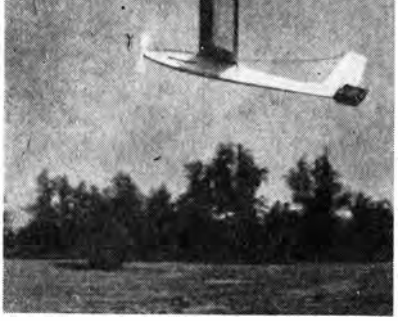


Bild 6.7
Elektrosegelflugmodell *Mosquito*

Die Motorenentwicklung ging rasch weiter. Zum Beispiel wurde bis 1975 das Leistungsgewicht der Elektroflugmotoren auf die Häfte reduziert. Damit war es möglich, auch 1motorige Segelflugmodelle mit noch besseren Leistungen zu konstruieren. Der Pionier des Elektroflugs *F. Militky* entwickelte das Segelflugmodell *Mosquito* (Bild 6.7). Bei diesem Modell ist der Motor mit Getriebe im Rumpf untergebracht. Nach dem Ausschalten des Motors klappen die Luftschraubenblätter zurück, so daß sie das Gleitflugverhalten nicht beeinträchtigen, und die Luftschraube kommt zum Stillstand.

Als nächstes wurden kleine Sportmodelle entwickelt, mit denen einfacher Kunstflug möglich ist. Ein typischer Vertreter dieser Kategorie ist das Modell *Sky fly* (Bild 6.8). In diesem Modell mit 1,25 m Spannweite und 1200 g Masse ist der gleiche Akkumulator und der gleiche Motor wie im *Mosquito* eingebaut, nur ohne Getriebe. Mit diesem Modell können auf einer befestigten Piste Bodenstarts ausgeführt werden.

Von erfahrenen Modellbauern wurden bereits voll kunstflugtaugliche Modelle und Hochgeschwindigkeitsmodelle entwickelt. *F. Geist* (BRD) erzielte beispielsweise mit einem Hochgeschwindigkeitsmodell am 5. 6. 1977 auf einer Meßstrecke die Geschwindigkeit von 189,65 km/h.

Selbst Elektroflugmodelle mit Einziehfahrwerk wurden erfolgreich erprobt. Daneben gibt es Versuche von Modellsportlern, wie *F. Militky*, *H. Schenk* u. a., den Motor aus Solarzellen

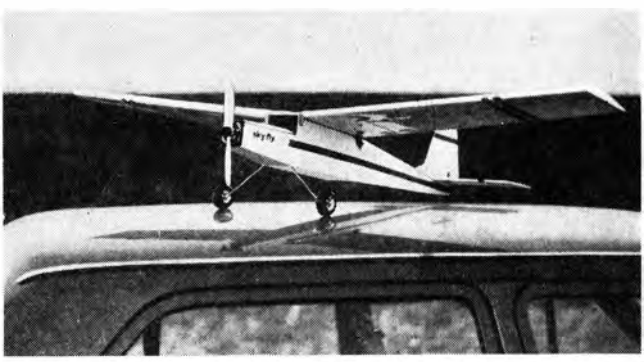


Bild 6.8 Elektromotorflugmodell *Sky Fly*

zu speisen. Auch am elektrogetriebenen Hubschrauber wird bereits gearbeitet. Die weitere Entwicklung des Elektroflugs geht eindeutig in die Richtung, höhere Leistungen aus Motor und Batterie bei gleichzeitig verringertem Gewicht herauszuholen. Daß das zusätzlich die Lösung bestimmter Probleme voraussetzt, wurde in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt. Da man, bedingt durch die physikalischen Daten von Kupfer und Eisen, den Wirkungsgrad des Kleinmotors bei Höchstlast und mit vertretbarem Aufwand kaum über 65% steigern kann, ist ein Hauptproblem die thermische Belastung und ihre Beherschung

7. Ladetechnik

7.1. Vorbemerkungen

Aus den Darlegungen im Band 2 geht hervor, daß es bei den Akkumulatoren folgende Lademethoden gibt:
— Schnelladen,
— Dauerladen,
— Normalladen,
— Erhaltungsladen
sowie die Ladearten
— Konstantstromladen,
— Konstantspannungsladen,
— Laden nach W-Kennlinie,
— Laden nach *UI*-Kennlinie,
— strombegrenztes Laden,
— spannungsbegrenztes Laden.
Bei der Beschreibung von Pflege und Wartung der einzelnen Akkumulatortypen wurde ausdrücklich darauf verwiesen, welche Lademethoden angewendet werden können und warum bzw. welche Einschränkungen gelten. Mit Hilfe elektronischer Schaltungen lassen sich im Prinzip alle aufgeführten Ladearten realisieren. Bei einfachen Ladegeräten muß man den Ladevorgang ständig kontrollieren und beim Erreichen bestimmter Kennwerte (Ladeschlußspannung, Grenztemperatur, volle Kapazität o. a.) abbrechen. Automatische Ladegeräte verfügen über eine elektronische Regeleinrichtung, die das selbständig bewirkt. Der Bedienungskomfort eines automatischen Ladegeräts und vor allem auch die Bedienungssicherheit (Vermeiden von Überladungen bzw. Schäden am Akkumulator) sind damit kaum zu überbieten. Sie erfordern aber auch einen wesentlich höheren Schaltungs- und damit Kostenaufwand.
Dem Leser werden im folgenden verschiedene Schaltungsvarianten, angefangen vom einfachsten bis zum vollautomatischen Ladegerät, abgestimmt auf den jeweiligen Akkumulatortyp, vorgestellt. Alle Schaltungen sind für die bei Modellantrieben gebräuchlichen Akkumulatorgrößen (bis 12 V und bis 20 Ah) aus-

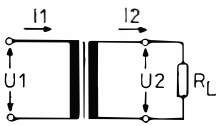
gelegt. Die Schaltungen wurden erprobt und sind mit handelsüblichen Bauelementen nachbaufähig. Für welches Gerät sich der Leser entscheidet, hängt vom Akkumulatortyp, vom Aufwand, den man treiben kann oder will, und von den Beschaffungsmöglichkeiten für die Bauteile ab. Bei jedem Ladegerät sind Kompromisse zu schließen — es gibt nicht schlechthin das „beste" Ladegerät, das zudem noch für alle Anwendungen optimal geeignet wäre.

Für die Auslegung des Ladegeräts sind aber nicht nur Überlegungen zur Anwendung entscheidend, sondern auch die Sicherheitsvorschriften für elektrische Geräte. Bei Ladegeräten und Antriebsspannungsquellen sind zur Gewährleistung des Berührungsschutzes nur Spannungen unter 42 V zulässig. Das ist vor allem dadurch begründet, daß die Akkumulatoren nicht fest im Modell eingebaut werden und damit nicht berührungssicher sind. Selbst das einfachste der im folgenden beschriebenen Ladegeräte hat daher einen Transformator zur Anpassung der Spannung und Gewährleistung des Berührungsschutzes. Damit sich der Leser den für seinen speziellen Zweck benötigten Transformator selbst herstellen kann, wird an einem Beispiel die Berechnung kurz erläutert. Aus den Darlegungen zum Verhalten der verschiedenen Akkumulatorarten und -typen geht hervor, daß beim Laden Ladezeit und Ladestrom genau eingehalten werden müssen. Für die Einstellung des Ladestroms werden in den Abschnitten 7.4. und 7.5. verschiedene Verfahren vorgestellt.

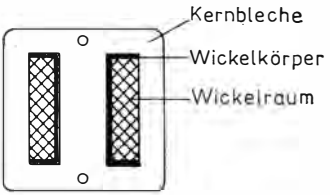
7.2. Berechnung eines Netztransformators

Unentbehrlicher Bestandteil selbst des einfachsten Ladegeräts ist ein Transformator. Dieser hat die Aufgabe, die Netzspannung von 220 V auf den für den Ladevorgang erforderlichen Wert herabzutransformieren und gleichzeitig den Ladestromkreis galvanisch vom Netz zu trennen. Letzteres ist besonders wichtig, um den erforderlichen Berührungsschutz gegenüber Netzspannung herzustellen. Damit gesundheitliche Schäden beim Umgang mit elektrischen Geräten vermieden werden, dürfen die der Berührung zugänglichen Teile keine höhere Spannung als 42 V gegeneinander oder gegen Erde führen!

In vielen Fällen wird es kaum möglich sein, den für den jewei-



a) Ersatzschaltung



b) Wickelraum

Bild 7.1 Zur Berechnung des Transformators; a — Ersatzschaltung, b — Wickelraum

ligen Anwendungsfall erforderlichen Transformator als fertiges Bauteil im Geschäft zu kaufen. Demzufolge muß man sich selbst helfen und den Transformator anfertigen lassen oder selbst wickeln. Für den letztgenannten Fall sei ein Beispiel durchgerechnet. Der Rechengang läßt sich dann auf andere Anwendungsfälle ohne Schwierigkeiten übertragen. Zum Wickeln des Transformators werden einige praktische Hinweise gegeben. Auf Funktion und Wirkungsweise des Transformators kann in diesem Zusammenhang aus Platzgründen nicht eingegangen werden. Darüber kann sich der Leser in der Literatur über die Grundlagen der Elektronik informieren. Bevor man an das Wickeln des Transformators geht, sind einige Berechnungen unerläßlich.

Beispiel

Für ein Ladegerät soll der Transformator auf der Sekundärseite $U_2 = 30\ \text{V}$ und $I_2 = 0{,}6\ \text{A}$ abgeben. Zu berechnen sind Kerngröße und Wickeldaten.

Mit den gegebenen Größen Primärspannung U_1, Sekundärspannung U_2, Sekundärstrom I_2 werden berechnet: Nennleistung P_N, Kerngröße, Primär- und Sekundärwindungszahl N_1 und N_2, Drahtdurchmesser d_1 und d_2.

1. Kerngröße

Die Kerngröße richtet sich nach der Scheinleistung. Zur Bestimmung der Scheinleistung errechnet man zunächst die Sekundärleistung

$$P_2 = U_2 I_2, \tag{17}$$

mit P_2 — Sekundärleistung, U_2 — Sekundärspannung, I_2 — Sekundärstrom, zu

Tabelle 7.1.
Kennwerte zur Berechnung von Kleintransformatoren Typ M

Kennwerte	Formelzeichen	Einheit	M 42	M 55	M 65	M 74	M 85	M 102/35	M 102/53
1 Scheinleistung	P_S	W	4	12	25	50	70	120	170
2 Wirkungsgrad	η	%	50	66	76	80	82	85	88
3 Windungszahl je Volt	n	V^{-1}	22	11,4	7,52	5,43	4,32	2,92	2,27
4 Spannungsabfall bei Vollast	U_{V2}	%	35	20	14	12	9	7,5	7
5 max. Stromdichte	i	$A \cdot mm^{-2}$	3,5	3,15	2,9	2,6	2,7	2,55	2,4
6 Wickelraum	Q	mm^2	185	285	370	485	530	820	820
7 Anzahl der Kernbleche		0,5 mm	29	40	50	60	60	67	97
		0,35 mm	41	58	72	86	86	95	138

$$P_2 = 30\ \text{V} \cdot 0{,}6\ \text{A} = 18\ \text{VA}.$$

Nach Tabelle 7.1., Zeile 1, wäre dafür die Kenngröße M 65 ausreichend. Man errechnet nun die Scheinleistung

$$P_S = \frac{P_2}{\eta}, \tag{18}$$

mit P_S — Scheinleistung, P_2 — Sekundärleistung, η — Wirkungsgrad, zu

$$P_S = \frac{18\ \text{VA}}{0{,}76} \approx 23{,}7\ \text{W}$$

und überprüft nochmals am Wert von Zeile 1 (25 W), daß der Transformator nicht überlastet ist. Wäre der errechnete Wert größer als die für die Kerngröße angegebene Scheinleistung, dann müßte der nächstgrößere Kern gewählt werden. Im Beispiel sind 23,7 W < 25 W, der Kern M 65 kann also verwendet werden.

2. Windungszahlen

Mit den Daten von Zeile 3 berechnet man die Windungszahlen

$$N_{1/20} = n U_{1/20}, \tag{19}$$

mit N_1 — Primärwindungszahl, N_{20} — Sekundärwindungszahl im Leerlauf, n — Faktor Windung je Volt, $U_{1/20}$ — Primär-, Sekundärspannung, zu

$$N_1 = 7{,}52 \cdot 220\ \text{V} = 1655,$$
$$N_{20} = 7{,}52 \cdot 30\ \text{V} = 225.$$

Da bei fließendem Strom in der Sekundärwicklung ein Spannungsabfall auftritt, um den sich die Sekundärspannung verringert, muß der Wert für die Sekundärwindungszahl korrigiert werden. Man erhält

$$N_2 = N_{20}(1 + U_{V2}), \tag{20}$$

mit N_2 — Sekundärwindungszahl bei Vollast, N_{20} — Sekundärwindungszahl bei Leerlauf, U_{V2} — Spannungsabfall bei Vollast in Prozent,
und mit den Angaben von Zeile 4

$$N_2 = 225\ (1 + 0{,}14) = 258.$$

3. Drahtdurchmesser

Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Stromdichte

errechnet man als nächstes die Drahtdurchmesser für die Primär- und die Sekundärwicklung. Für die Sekundärseite erhält man

$$q_2 = \frac{I_2}{i}, \tag{21}$$

mit q_2 — Querschnitt des Sekundärleiters, I_2 — Sekundärstrom, i — maximale Stromdichte,
und mit den Angaben von Zeile 5

$$q_2 = \frac{0{,}6\ \text{A}}{2{,}9\ \text{A} \cdot \text{mm}^{-2}} = 0{,}207\ \text{mm}^2$$

und daraus den Drahtdurchmesser

$$d_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{q_2}{\pi}}, \tag{22}$$

mit d_2 — Durchmesser des Sekundärleiters, q_2 — Querschnitt des Sekundärleiters, zu

$$d_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}207\ \text{mm}^2}{3{,}14}} = 0{,}514\ \text{mm}$$

und wählt den nächstgrößeren Wert $d_2 = 0{,}52$ mm.
Für die Primärseite erhält man

$$I_1 = \frac{P_\text{S}}{U_1}, \tag{23}$$

mit I_1 — Primärstrom, P_S — Scheinleistung, U_1 — Primärspannung, zu

$$I_1 = \frac{23{,}7\ \text{W}}{220\ \text{V}} = 0{,}108\ \text{A}$$

und damit

$$q_1 = \frac{I_1}{i}, \tag{24}$$

mit q_1 — Querschnitt des Primärleiters, I_1 — Primärstrom, i — Stromdichte, zu

$$q_1 = \frac{0{,}108\ \text{A}}{2{,}9\ \text{A} \cdot \text{mm}^{-2}} = 0{,}0372\ \text{mm}^2$$

und damit

$$d_1 = 2\sqrt{\frac{q_1}{\pi}}, \tag{25}$$

mit d_1 — Durchmesser des Primärleiters, q_1 — Querschnitt des Primärleiters, zu

$$d_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}0372 \text{ mm}^2}{3{,}14}} = 0{,}218 \text{ mm}$$

und wählt den nächstgrößeren Wert für $d_1 = 0{,}22$ mm.

4. Wickelraumkontrolle

Zum Schluß kontrolliert man rechnerisch, ob der vorhandene Wickelraum auf dem Wickelkörper für die berechnete Wicklung ausreicht. Man erhält für die Primärseite

$$Q_1 = \frac{N_1 q_1}{K}, \tag{26}$$

für die Sekundärseite

$$Q_2 = \frac{N_2 q_2}{K} \tag{27}$$

und für den Gesamtwickelraum

$$Q = Q_1 + Q_2, \tag{28}$$

mit Q_1 — Wickelraum für die Primärwicklung, Q_2 — Wickelraum für die Sekundärwicklung, Q — Gesamtwickelraum, N_1/N_2 — Windungszahl für Primär- und Sekundärseite, q_1/q_2 — Leiterquerschnitt für Primär- und Sekundärseite, K — Füllfaktor; er wird erfahrungsgemäß zu 0,4 bis 0,5 angenommen.

Es ergeben sich folgende Werte:

$$Q_1 = \frac{1655 \cdot 0{,}0372 \text{ mm}^2}{0{,}4} \approx 154 \text{ mm}^2,$$

$$Q_2 = \frac{258 \cdot 0{,}207 \text{ mm}^2}{0{,}4} \approx 134 \text{ mm}^2,$$

$$Q = 288 \text{ mm}^2.$$

Diesem Wickelraumbedarf steht der vorhandene Wickelraum von 370 mm² (Tabelle 7.1., Zeile 6) gegenüber.

Folglich ist $Q_{ges} > Q$ und mit etwa 80 mm² noch genügend Reserve für eine zusätzliche Lagenisolation vorhanden. Selbst wenn man bedenkt, daß der gewählte Drahtdurchmesser etwas größer als der berechnete ist, reicht der Wickelraum aus, denn der Füllfaktor 0,4 sagt aus, daß noch eine weitere Reserve besteht.

Die berechneten Daten werden der Materialbeschaffung zugrunde gelegt. Zusätzlich sind dafür in Tabelle 7.1. noch die benötigten Stückzahlen Kernbleche angegeben.

Abschließend zum Transformator noch einige praktische Hinweise für die Selbstherstellung. Für die Wicklung verwendet man Kupferlackdraht mit dem berechneten Durchmesser. Geringfügig stärkere Durchmesser (Wickelraum!) sind zulässig. Bei der Verarbeitung des Drahtes geht man sorgsam zu Werke, damit die Lackisolation nicht beschädigt wird. Durch beschädigte Isolation entstehen ernste Gefahren für Mensch und Gerät! Zum Erleichtern des Wickelns eignet sich recht gut eine mechanische Handbohrmaschine. Den Wickelkörper nimmt man auf einen Dorn und zählt dann nur die Umdrehungen der Handkurbel (Schnellgang!).

Die unterste Wicklung ist immer die Primärwicklung. Auf den Wickelkörper werden zunächst 2 Lagen Lackpapier aufgebracht. Über den Wicklungsanfang schiebt man farbigen Gewebeschlauch, der vom Wickelanfang etwa eine Windung um den Wickelkörper herumreicht. Den Windungsanfang fädelt man durch den untersten seitlichen Durchbruch des Wickelkörpers, läßt etwa 5 cm zum Anlöten überstehen und notiert die Farbe des Isolierschlauchs. Nun wird die Primärwicklung in einem Arbeitsgang zügig aufgebracht. Dabei wickelt man unter mäßigem Zug am Draht (Draht durch einen sauberen Leinenlappen laufen lassen und dabei führen) sauber Windung an Windung und Lage für Lage. Wildes Wickeln (kreuz und quer) führt nicht nur zu Wicklungsschäden, sondern beansprucht auch mehr Wickelraum als errechnet. Hat die Rechnung zur Wickelraumkontrolle ergeben, daß genügend Reserve vorhanden ist, so legt man nach je 2 bis 3 Wicklungslagen eine Lage Lackpapier als zusätzliche Isolation ein. Es ist gleichmäßig straff zu wickeln, da bei einem festen Wickel wesentlich weniger Schäden auftreten. Bei dünnen Drähten (unter 0,3 mm Durchmesser) läßt sich vorher durch eine Reißprobe der zulässige Zug beim Wickeln bestimmen.

Tabelle 7.2.
Kennwerte zur Berechnung von Kleintransformatoren Typ EI

Kennwerte	Formelzeichen	Einheit	EI 70	EI 91	EI 105	EI 130/36	EI 130/46	EI 150/40	EI 150/50	EI 150/60
1 Scheinleistung	P_S	W	25	50	125	250	320	370	450	550
2 Wirkungsgrad	η	%	82,6	88,8	89,6	91	92	92,4	91,5	92,8
3 Windungszahl je Volt	n	V^{-1}	10,92	5,02	3,98	2,92	2,31	2,31	1,85	1,56
4 Spannungsabfall bei Vollast	U_{V2}	%	16	9	7,5	6	5	5	4	4
5 max. Stromdichte	i	$A \cdot mm^{-2}$	2,9	2,85	2,65	2,2	2,1	1,8	1,7	1,6
6 Wickelraum	Q	mm^2	536	792	1029	1658	1658	2165	2165	2165
7 Anzahl der Kernbleche	0,5 mm		38	60	60	68	87	75	94	112
	0,35 mm		58	85	85	97	124	107	112	160

Muß der Draht angestückt werden, so kratzt man mit einem scharfen Messer vorsichtig die Lackisolation ab, verdrillt und verlötet beide Drahtenden miteinander. Zinn- oder Drahtspitzen dürfen dabei nicht entstehen, da sie die benachbarte Windungsisolation beschädigen können. Die Verbindungsstelle isoliert man, indem sie in ein Stück gefaltetes Lackpapier gebettet wird. Das herausgeführte Wicklungsende erhält wie der Anfang eine Isolation. Die Primärwicklung deckt man mit 2 Lagen Lackpapier ab. Wicklungsanfang und -ende der Sekundärwicklung werden mit andersfarbigem Gewebeschlauch isoliert (notieren) und ebenfalls seitlich herausgeführt. Das Wicklungsende sichert man durch 3 Windungen Bindfaden gegen Lösen. Die gesamte Wicklung wird nach außen mit 2 bis 3 Lagen Ölpapier abgedeckt, dessen Ende Selbstklebeband festlegt. Unter die letzte Lage Ölpapier legt man einen Zettel mit den Wickeldaten (U_1, U_2, n_1, n_2), damit man später auf einen Blick die Daten des Transformators erfassen kann.

Die Kernbleche legt man wechselseitig ein, damit kein Luftspalt entsteht. Das Blechpaket wird durch aufgelegte Blechstreifen oder Befestigungswinkel zusammengepreßt. Anschließend werden die Wicklungsenden in einer kleinen Schlaufe verlegt, abisoliert und an der Lötösenleiste angelötet. Der Transformator sollte dann probeweise eine Viertelstunde im Leerlauf arbeiten. Hat man sauber und fest gewickelt und die Bleche fest gestopft, so darf er weder brummen noch sich zu stark erwärmen (im Leerlauf handwarm). Zu starke Erwärmung im Leerlauf deutet auf Schluß bzw. Schaden an der Wicklung hin.

In Tabelle 7.1. sind die zur Berechnung eines Netztransformators benötigten Daten zusammengefaßt. Da man mit dem Kerntyp M im Leistungsbereich von 4 bis 170 W arbeiten kann, wurde der Einfachheit halber nur dieser Kerntyp der Berechnung zugrunde gelegt. Will der Leser einen Netztransformator mit EI-Kern aufbauen, so ist der Rechengang im Prinzip gleich. Die Daten für diesen Kerntyp findet er in der Tabelle 7.2.

7.3. Ladezeitbestimmung

Für das Bestimmen der Ladezeit bieten sich 2 Verfahren an. Entweder mißt man vor dem Laden die erforderliche Kapazitätsmenge und legt damit unter Berücksichtigung des Ladefaktors

die Ladezeit fest, oder man beendet den Ladevorgang bei Erreichen der Ladeschlußspannung. Für Vergeßliche ist das allerdings problematisch, denn viele Akkumulatoren sind allein deswegen „gestorben", weil ihr Besitzer vergessen hatte, den Ladevorgang rechtzeitig zu beenden. Aus den Darlegungen in den vorangegangenen Abschnitten weiß der Leser, daß nur einige Akkumulatortypen überladefähig sind.

Das Bestimmen der Ladezeit durch Kapazitätsmessung ist im praktischen Betrieb nicht ganz unproblematisch. Durch Alterungsprozesse vermindert sich bei jedem Akkumulator die Kapazität. Geht man bei der Kapazitätsmessung von der Kapazität des neuen Akkumulators aus, so erhält man für einen gealterten Akkumulator zu lange Ladezeiten. Das ist gleichbedeutend mit Überladen. Das läßt sich nur durch die Kontrolle der vom Akkumulator tatsächlich noch aufgebrachten effektiven Kapazität verhindern. Daher prüft man zweckmäßigerweise alle Akkumulatoren jährlich einmal hinsichtlich der effektiven Kapazität. Dazu werden sie bis zur Ladeschlußspannung aufgeladen und nach einem Tag Pause mit dem Nennstrom kontrolliert entladen. Dabei mißt man die Zeit bis zum Erreichen der Entladeschlußspannung und errechnet nach

$$K_{\mathrm{eff}} = I_{\mathrm{E}} t_{\mathrm{ent}}, \tag{29}$$

mit K_{eff} — effektive Kapazität, I_{E} — Nennentladestrom, t_{ent} — Entladezeit,

die effektive Kapazität des Akkumulators und notiert diesen Wert am besten mit Jahreszahl direkt auf dem Akkumulatorgehäuse. Die so ermittelte effektive Kapazität bzw. beim neuen Akkumulator die Nennkapazität (obwohl auch da durchaus Abweichungen vom Nennwert auftreten können) ist Grundlage der Ladezeitbestimmung.

Bei dem zweiten Verfahren spielt es keine Rolle, ob der Akkumulator völlig oder nur teilweise entladen ist. Man mißt die Klemmenspannung am Akkumulator bei Belastung mit dem Nennstrom. Durch Vergleich mit der jeweiligen Entladekennlinie ermittelt man dann die vorhandene bzw. einzuladende Kapazitätsmenge. Nach Gl. (30) ergibt sich die Ladezeit

$$t_{\mathrm{L/h}} = k_{\mathrm{L}} \cdot \frac{K_{\mathrm{eff/Ah}}}{I_{\mathrm{L/A}}}, \tag{30}$$

mit t_L — Ladezeit in Stunden (h), k_L — Ladefaktor (NiCd-Akkumulator 1,4, Pb-Akkumulator 1,1, AgZn-Akkumulator 1,05), K_{eff} — effektive Kapazität in Ah, I_L — Ladestrom in A.
Ein Beispiel soll das Verfahren verdeutlichen.

Beispiel

Für einen neuen gasdichten NiCd-Akkumulator 6 V/6 Ah wird unter Belastung mit $I_E = 0{,}1 \cdot K_5 = 0{,}6$ A eine Klemmenspannung $U_B = 5{,}25$ V gemessen (= 1,05 V je Zelle). Durch Vergleich mit der Entladekennlinie ermittelt man, daß etwa 50% Kapazität eingeladen werden müssen.
Nach Gl. (30) erhält man

$$t_L = 1{,}4 \cdot \frac{6 \text{ Ah} \cdot 0{,}5}{0{,}6 \text{ A}} = 7 \text{ h}.$$

Der Akkumulator muß 7 Stunden mit 0,6 A geladen werden.
Da es sich beim Prüfen, Vergleich mit der Kennlinie und Festlegen der Ladezeit um einen oft wiederkehrenden Vorgang handelt, fertigt man sich am besten eine Tabelle an, in die man die für den Akkumulator typischen Werte der Entladespannungen und die nach Gl. (30) errechneten Werte für die Ladezeit einträgt, so daß sie dann direkt abgelesen werden können. Mit Tabelle 7.3. ist ein Beispiel für gasdichte Nickel-Kadmium-Akkumulatoren (Rechteckzellen 1 bis 7,5 Ah — GLZ) angegeben. Für andere Akkumulatortypen bzw. -arten kann sich der Leser entsprechende Tabellen selbst anfertigen. Daß man die effektive Kapazität eines Akkumulators durch Zuhilfenahme einer kleinen Zusatzelektronik elegant und ohne ständige Kontrolle bestimmen kann, wird im Abschnitt 8. dargelegt.

Tabelle 7.3.
Kapazitätsbestimmung bei gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren (Massezelle) durch Klemmenspannungsmessung unter Belastung ($I_E = 0{,}1 \cdot K_5$)

U	V	1,00	1,10	1,20	1,25	1,26	1,26	1,26	1,27	1,28	1,32	1,38
K_5	%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Ladezeit	h	14	13	12	10,5	9,5	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0

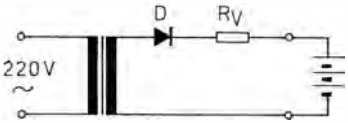


Bild 7.2
Einweggleichrichter

7.4. Laden mit Vorwiderstand (W-Kennlinie)

Das einfachste Ladegerät ist der Einweggleichrichter mit Vorwiderstand (Bild 7.2). Diese Schaltung läßt sich bis zu einer sekundärseitigen Leistungsabgabe des Transformators von 10 W anwenden. Bei größeren Leistungen sind Zweiweggleichrichter (Bild 7.3) wirtschaftlicher. Diese Forderung leuchtet sofort ein, wenn man den Verlauf des Stromes im Gleichrichterkreis betrachtet (Bild 7.4). Bei gleicher Amplitude des Wechselstroms auf der Sekundärseite ist der mittlere Gleichstrom im Ladekreis bei Einweggleichrichtung nur halb so groß wie der bei Zweiweggleichrichtung. Unter Vernachlässigung der Verluste im Transformator gilt für ohmsche Belastung des Gleichrichters bei Einweggleichrichtung

$$I_{-} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{2\sim}, \tag{31}$$

$$I_{-} = 0{,}637 \cdot I_{2\sim}$$

und für Zweiweggleichrichtung

$$I_{-} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{2\sim}, \tag{32}$$

$$I_{-} = 0{,}9 \cdot I_{2\sim},$$

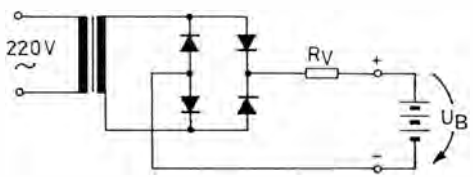


Bild 7.3 Zweiweggleichrichter (*Graetz*-Schaltung)

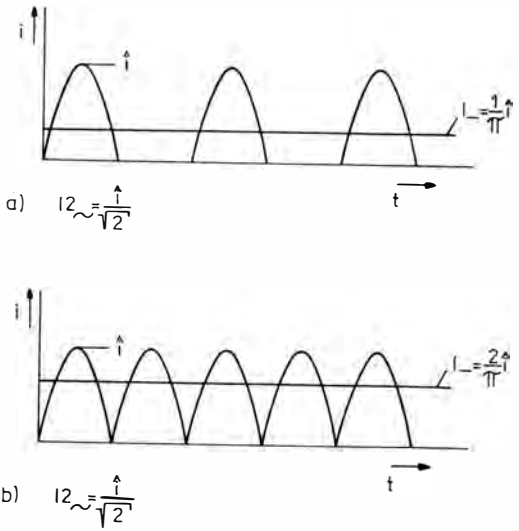


Bild 7.4 Stromverlauf im Gleichrichterkreis; a — Einweggleichrichter, b — Zweiweggleichrichter

mit I_- — mittlerer Gleichstrom, $I_2\sim$ — Sekundärstrom des Transformators.

Daraus ersieht man, daß der Wirkungsgrad des Zweiweggleichrichters um etwa 50% besser als der des Einweggleichrichters ist. Wenn Gl. (31) und Gl. (32) auch nur für ohmsche Belastung gelten, so sind die Verhältnisse bei Belastung mit Gegenspannung (Laden eines Akkumulators) ganz ähnlich. Der Berechnungsweg für den Belastungsfall mit Gegenspannung ist jedoch umfangreicher. Er müßte für jeden Belastungsfall gesondert durchgeführt werden, da der mittlere Gleichstrom vom Stromflußwinkel abhängt. Der Stromflußwinkel ändert si h aber in Abhängigkeit vom Ladezustand und der Größe des Vorwiderstands mehr oder weniger stark, so daß darauf verzichtet sei. Für die Berechnung der Ladegeräte werden daher Erfahrungswerte angegeben bzw. Gl. (31) und Gl. (32) als brauchbare Näherung benutzt. Für den Ladestrom bei Einweggleichrichtung gilt in Näherung:

$$I_- = (0{,}45 \ldots 0{,}36) \cdot I_2\sim \tag{33}$$

bzw.

$$I_2\sim = (2{,}72 \ldots 2{,}22) \cdot I_-$$

und bei Zweiweggleichrichtung

$$I_- = (0{,}64 \ldots 0{,}52) \cdot I_2\sim \tag{34}$$

bzw.

$$I_2\sim = (1{,}93 \ldots 1{,}57) \cdot I_-,$$

mit I_- — mittlerer Gleichstrom, $I_2\sim$ — Sekundärstrom des Trans-

Außer dem Strom braucht man zur Berechnung des Transformators noch die Sekundärspannung $U_2\sim$. Durch die Gleichrichtung ist die erzeugte Gleichspannung ebenfalls über den Stromflußwinkel mit der Sekundärspannung verknüpft. Als Richtwert für die Gleichspannung kann man ansetzen

$$U_- = (1{,}5 \ldots 2) \cdot U_\mathrm{L}, \tag{35}$$

mit U_- — Spannung am Gleichrichter, U_L — Spannung am Akkumulator (Ladespannung).
Wenn das Ladegerät für einen 12-V-Akkumulator berechnet ist, dann muß also von einer Gleichspannung von 18 bis 24 V ausgegangen werden. Welche Vorteile die höhere Spannung bietet, wird im folgenden noch dargelegt.
Mit dem Wert für die Gleichspannung errechnet man dann die Sekundärspannung des Transformators. Für ohmsche Belastung gilt bei Einweggleichrichtung

$$U_2\sim = 2{,}22 \cdot U_-, \tag{36}$$

mit $U_2\sim$ — Sekundärspannung am Transformator, U_- — Spannung am Gleichrichter,
und bei Zweiweggleichrichtung

$$U_2\sim = 1{,}11 \cdot U_-. \tag{37}$$

Unter Beachtung der Verluste im Transformator und Gleichrichter erhält man dann für Ein- und Zweiweggleichrichtung gleichermaßen

$$U_2\sim = (1 \ldots 0{,}82) \cdot U_-. \tag{38}$$

Da durch Einfügen des ohmschen Widerstands R_V (Bild 7.3) ein gemischter Belastungsfall vorliegt, kann man, ohne einen Fehler zu begehen, Gl. (38) den Berechnungen zugrunde legen.

Als nächstes ist nun der Wert des Vorwiderstands R_V zu berechnen. Angenommen wird, mit dem Ladegerät seien 2 Nickel-Kadmium-Fahrakkumulatoren mit den Daten 6 V/6 Ah und 12 V/6 Ah zu laden. Dann gilt nach Bild 7.3

$$U_- = U_V + U_{Bi} \tag{39}$$

mit U_- — Spannung am Gleichrichter, U_V — Spannungsabfall am Vorwiderstand, U_B — Ladespannung am Akkumulator.
Für U_- wird ein Wert von $U_- = 20$ V angenommen, und bei Ladung mit $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ beträgt $I_L = 0{,}6$ A. Die Entladeschlußspannung für die beiden Akkumulatoren ist 6,0 V bzw. 12,0 V. Nach Umformung von Gl. (39) erhält man

$$U_V = U_- - U_B,$$

für 6 V/6 Ah

$$U_{V1} = 20\text{ V} - 6\text{ V} = 14\text{ V}$$

und für 12 V/6 Ah

$$U_{V2} = 20\text{ V} - 12\text{ V} = 8\text{ V}.$$

Mit dem Ohmschen Gesetz berechnet man

$$R_V = \frac{U_V}{I_L}, \tag{40}$$

mit R_V — Vorwiderstand, U_V — Spannungsabfall am Vorwiderstand, I_L — Ladestrom, zu

$$R_{V1} = \frac{14\text{ V}}{0{,}6\text{ A}} = 23{,}33\,\Omega,$$

$$R_{V2} = \frac{8\text{ V}}{0{,}6\text{ A}} = 13{,}33\,\Omega.$$

Nach

$$P_V = I_L U_V, \tag{41}$$

mit P_V — Verlustleistung, I_L — Ladestrom, U_V — Spannungsabfall am Vorwiderstand,
errechnet man die Belastbarkeit der beiden Vorwiderstände zu

$$P_{V1} = 0{,}6\text{ A} \cdot 14\text{ V} = 8{,}4\text{ W},$$
$$P_{V2} = 0{,}6\text{ A} \cdot 8\text{ V} = 4{,}8\text{ W}.$$

Die Vorwiderstände müssen also bis 10 W bzw. 5 W belastbar sein. Die Ladeschlußspannung des gasdichten NiCd-Akkumulators beträgt 1,45 V/Zelle. Damit erhält man für

$$U_{\mathrm{L}\,1\,\mathrm{end}} = 5 \cdot 1{,}45\ \mathrm{V} = 7{,}25\ \mathrm{V},$$
$$U_{\mathrm{L}\,2\,\mathrm{end}} = 10 \cdot 1{,}45\ \mathrm{V} = 14{,}5\ \mathrm{V}.$$

Berechnet man für diesen Wert den Ladestrom, so erhält man nach

$$I_{\mathrm{LS}} = \frac{U_- - U_{\mathrm{LS}}}{R_{\mathrm{V}}}, \tag{42}$$

mit I_{LS} — Ladestrom bei Ladeende, U_- — Spannung am Gleichrichter, U_{LS} — Ladeschlußspannung, R_{V} — Vorwiderstand,

$$I_{\mathrm{LS}\,1} = \frac{12{,}75\ \mathrm{V}}{23{,}33} = 0{,}547\ \mathrm{A},$$

$$I_{\mathrm{LS}\,2} = \frac{5{,}5\ \mathrm{V}}{13{,}33} = 0{,}413\ \mathrm{A}.$$

Trägt man die Werte für I_{L} und I_{LS} in ein Diagramm ein, so läßt sich daraus das typische Verhalten dieser Ladeschaltung erkennen. Das Ladegerät arbeitet mit fallender Kennlinie. Diese Art von Kennlinien bezeichnet man als W-Kennlinie (Widerstandskennlinie) bzw. den Ladevorgang als W-Ladung.
Aus den beiden Kennlinien wird auch ersichtlich, daß der Ladestromrückgang um so stärker ist, je kleiner der Spannungsabfall an R_{V} im Vergleich zur Ladespannung ist. Akkumulatoren werden aber möglichst mit Konstantstrom geladen, denn nur so kann man über die Zeit- und Strommessung eine genau kontrollierte Lademenge in den Akkumulator einladen. Damit wird auch deutlich, warum U_{V} größer als U_{L} sein soll und warum eingangs gesagt wurde, daß eine hohe Gleichrichterspannung U_- (im Vergleich zur Ladespannung U_{L}) Vorteile bietet. Durch die Wahl der Gleichrichterspannung kann der Verlauf der Ladekennlinie wesentlich beeinflußt werden.
In der Praxis ist es meist ein Problem, den Vorwiderstand R_{V} zu realisieren. Als sehr praktikabel hat es sich erwiesen, für R_{V} eine Glühlampe zu nehmen. So kann man im durchgerechneten Beispiel für $R_{\mathrm{V}2}$ eine Glühlampe 12 V/10 W ($R \approx 14{,}4\,\Omega$) und für $R_{\mathrm{V}1}$ 2 Glühlampen 12 V/10 W, in Reihe geschaltet, nehmen. Hinzu kommt, daß Glühlampen ausgesprochene Kaltleiter-

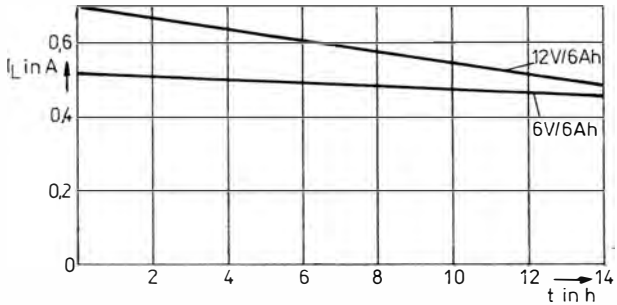


Bild 7.5 W-Kennlinien des Ladegeräts

eigenschaften haben. Wird R_V durch eine Glühlampe gebildet, so fällt die Kennlinie wesentlich schwächer, als in Bild 7.5 dargestellt, und man hat fast ein Konstantstromladegerät. Für andere Ladebedingungen (Ströme, Spannungen) können sicher aus dem breiten Sortiment an Kfz-Glühlampen geeignete Typen ausgewählt werden.

Das beschriebene Ladegerät mit den Festwiderständen $R_{V1/2}$ hat zwar den Vorteil, daß es einfach und preiswert ist, aber die Ladeströme und Spannungen sind fest eingestellt. Wer Akkumulatoren mit unterschiedlicher Klemmenspannung und unterschiedlichen Strömen laden muß, sollte sich jedoch ein Ladegerät mit einstellbarer Spannung bzw. einstellbarem Strom

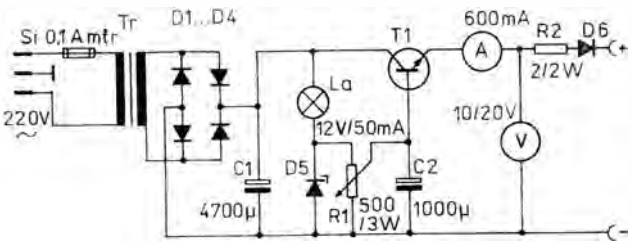


Bild 7.6 Ladegerät mit einstellbarem Ladestrom

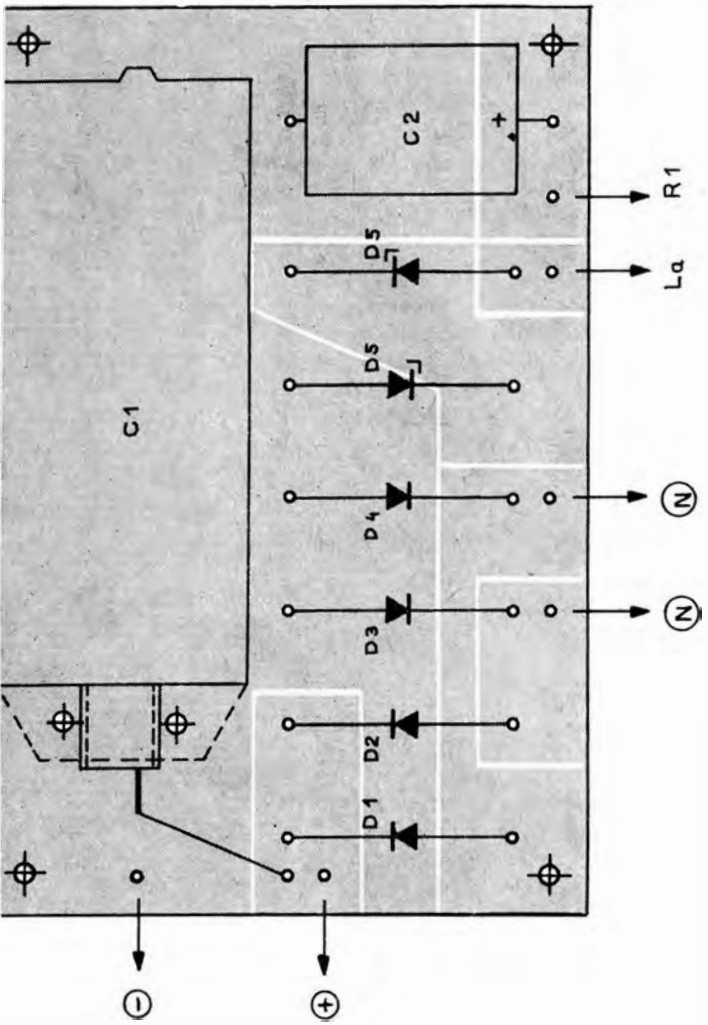
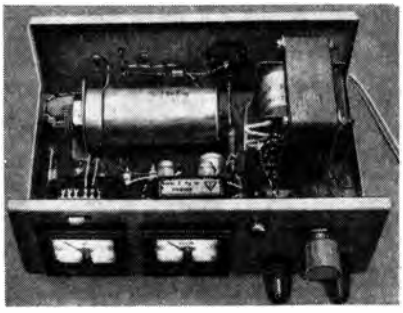


Bild 7.7 Bestückungsplan des Ladegeräts nach Bild 7.6

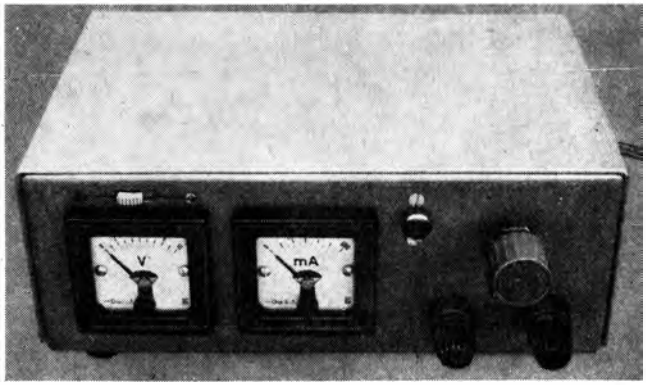
aufbauen. Ein solches Ladegerät wird im folgenden beschrieben. Bei dem Ladegerät nach Bild 7.6 (Bestückungsplan des Geräts Bild 7.7) übernimmt der Leistungstransistor T1 die Funktion des Vorwiderstands. Über Lampe La1, R1 und D5 erhält der Leistungstransistor eine stabilisierte Basisspannung. Da diese Basisspannung mit R1 einstellbar ist, kann man damit den Strom durch den Transistor (Ladestrom) und die Spannung an den Klemmen (Ladespannung) stufenlos zwischen Null und Maximum wählen. In der angegebenen Dimensionierung läßt sich das Gerät mit Strömen bis 600 mA bei Klemmenspannungen bis 20 V belasten. Bei anderer Auslegung des Transformators, des Gleichrichters und des Leistungstransistors können mit dem Gerät auch größere Ströme gestellt werden. Für höhere Klemmenspannungen muß man die Z-Spannung größer wählen. Als Richtwert kann gelten, daß die Z-Spannung um mindestens 3 V über der maximalen Klemmenspannung liegen soll.

Die Lampe La1 dient gleichzeitig als Einschaltkontrolle. Da das Gerät auch zur Stromversorgung bei anderen Laborarbeiten verwendet werden soll, ist mit C1 ein relativ großer Ladekondensator vorgesehen. Damit erreicht man selbst bei Vollast eine niedrige Brummspannung. Bei Verwendung des Geräts lediglich als Ladegerät kann C1 entfallen. Um Strom und Spannung zu kontrollieren, sind 2 Meßinstrumente eingebaut. Die Diode D6 verhindert, daß bei ausgeschaltetem Gerät und angeschlossenem Akkumulator ein Rückstrom über das Gerät fließt und sich der Akkumulator entlädt. R2 erhöht den Innenwiderstand des Geräts. Dadurch wird der Stellbereich gespreizt und so



a)

Bild 7.8
Fertiges Gerät;
a — Innenansicht,
b — Frontseite



b)

die genaue Einstellung des Ladestroms erleichtert. Das Gerät arbeitet mit ausgeprägt fallender Kennlinie (W-Kennlinie), d. h., je mehr sich der Akkumulator der Vollast nähert, um so mehr nimmt der Ladestrom ab. Bei Ladung eines Blei-Akkumulators sinkt der Strom von 300 mA bei Beginn der Ladung auf etwa 150 mA bei Ladeende.

Da bei Belastung des Geräts mit maximalem Strom und kleiner Klemmenspannung im Transistor T1 eine erhebliche elektrische Leistung in Wärme umgewandelt wird, muß T1 sehr gut gekühlt werden. Beim Mustergerät ist T1 mit der Rückwand verschraubt (isoliert!). Das Gehäuse wird damit als Kühlfläche genutzt — es sollte daher möglichst aus 1,5-mm-Aluminiumblech hergestellt sein. Das auf Bild 7.8 abgebildete Gerät ist nur eine Lösungsvariante. Andere Varianten sind durchaus möglich und richten sich vor allem nach vorhandenem Material und Bauelementen.

7.5. Laden mit Konstantstrom

Der Vorzug des Ladens mit Konstantstrom besteht darin, daß bis zum Ladeende — wie es der Name schon sagt — mit annähernd konstantem Strom geladen wird. Über Zeit- und Strommessung läßt sich daher genau die in einen Akkumulator eingeladene

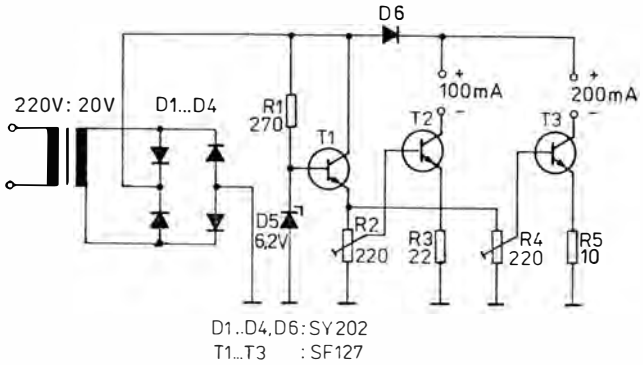


Bild 7.9 Konstantstromladegerät

Kapazitätsmenge bestimmen. Für einige Anwendungen ist das bedeutungsvoll. Im folgenden wird daher ein einfaches Konstantstromladegerät beschrieben (Bild 7.9). Im Prinzip entspricht dieses Ladegerät in seiner Funktion dem Ladegerät mit Vorwiderstand. Nur handelt es sich hier um einen Vorwiderstand mit negativer Kennlinie, der durch den Transistor T2 bzw. T3 realisiert wird. Transistor T2 bzw. T3 bildet für den Akkumulator die Konstantstromquelle. Damit der Ladestrom I_L weitgehend unabhängig von Schwankungen der Eingangsspannung und vom Ladezustand des Akkumulators wird, erzeugt I_L am Emitterwiderstand R3 bzw. R5 einen Spannungsabfall. Dieser Spannungsabfall wird mit der Referenzspannung verglichen, die man mit der Z-Diode und T1 gewinnt. Die Schaltung ist für die Ströme 100 mA und 200 mA ausgelegt. Für größere Ströme kann die Schaltung entsprechend dimensioniert werden. Der Transistor *KF 587* (Tesla) läßt sich bis maximal $I_{C\,max} = 500$ mA und $P_{tot} = 500$ mW belasten. Die Diode D6 verhindert das Entladen des angeschlossenen Akkumulators bei angeschaltetem Gerät.

7.6. Laden mit Spannungsbegrenzung

Das Laden mit Vorwiderstand oder Konstantstrom ermöglicht zwar den Aufbau recht einfacher Ladegeräte, hat aber auf jeden

Fall den Nachteil, daß man den Ladevorgang kontrollieren muß. Beim Laden mit Spannungsbegrenzung entfällt diese Kontrolle, denn das Ladegerät beendet beim Erreichen der einstellbaren Ladeschlußspannung den Ladevorgang selbständig. Abgesehen von der Sicherheit, die man damit gewinnt, wird der Ladevorgang entscheidend vereinfacht. Es genügt, den Akkumulator an das Ladegerät anzuschließen und ihn irgendwann nach beendeter Ladung wieder abzuklemmen. Für die Ladung mit Spannungsbegrenzung wurden verschiedene Schaltungen entwickelt, die sich durch Aufwand und Schaltverhalten unterscheiden.

Für alle nachfolgend beschriebenen Ladegeräte gibt es verschiedene Möglichkeiten, den Abschaltpunkt einzustellen. Das einfachste Verfahren ist die Einstellung mit einem vollgeladenen Akkumulator. Ein möglichst neuer Akkumulator wird zunächst bis zur Entladeschlußspannung entladen und anschließend mit einer kontrollierten Normalladung bis zur Ladeschlußspannung geladen. Diesen Akkumulator schließt man an das Ladegerät mit Spannungsbegrenzung an und stellt auf den für den Akkumulator typischen Wert des Stromes bei Erhaltungsladen, $I_L = 0{,}002 \cdot K_5$, ein. Durch die Kontrolladung eines entladenen Akkumulators überprüft man die richtige Lage des Abschaltpunkts.

Eine einfache Schaltungsvariante erhält man durch Verwendung eines Thyristors (Bild 7.10). Der Ladestrom bzw. die Einstellung auf den Nennwert wird wieder mit einem Vorwiderstand (Glühlampe) begrenzt. Bei Erreichen der Ladeschlußspan-

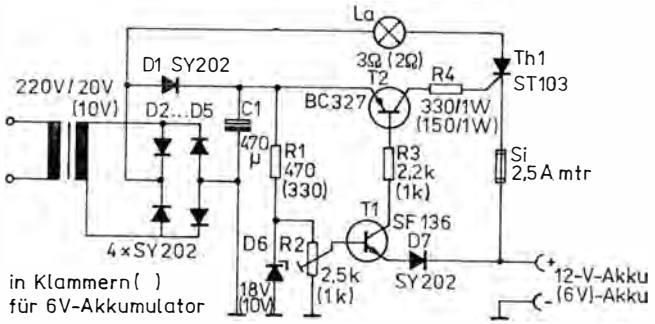


Bild 7.10 Ladegerät mit Thyristor

nung schaltet der Thyristor den Ladestrom ab bzw. verringert ihn bis auf den Wert für die Erhaltungsladung. Mit der Z-Diode D2 erzeugt man eine stabilisierte Vergleichsspannung, die über T1 und T2 den Thyristor Th1 steuert. Ist die Klemmenspannung des angeschalteten Akkumulators niedriger als die an R2 abgegriffene Vergleichsspannung, so ist die Basis von T1 positiver als dessen Emitter. Damit leitet T1 und demzufolge auch T2. Über T2 fließt der Zündstrom für den Thyristor Th1, und der Akkumulator wird über R1 und Th1 geladen. Da während des Ladevorgangs die Klemmenspannung am Akkumulator steigt, werden bei einem bestimmten Wert, der sich mit R2 genau einstellen läßt, die Transistoren T1 und T2 gesperrt, so daß der Thyristor Th1 nicht mehr zündet. Damit ist der Ladestrom abgeschaltet. Verwendet man als Vorwiderstand R1 zur Begrenzung des Ladestroms eine Lampe, so kann sie gleichzeitig als Ladekontrolle dienen.

Da diese Schaltung mit nur wenigen Bauelementen auskommt, kann man z. B. 2 Ladezweige (6 V und 12 V) in ein Gehäuse einbauen und hat immer noch ein preiswertes Gerät.

Ist das Ladegerät mit Thyristor auch einfach im Aufbau und für Ladeströme bis 2 A geeignet, so sei an dieser Stelle auch ausdrücklich auf seine Besonderheit hingewiesen. Der Ladestrom verringert sich von $I_L = 0{,}1 \cdot K_5$ auf $I_L = 0{,}05 \cdot K_5$ etwa in dem Spannungsbereich von 0,2 V. Damit ist dieses Ladegerät nur für Akkumulatoren mit ausgesprochen steigender Kennlinie (Pb, AgZn) geeignet.

Eine wesentlich empfindlichere Abschaltschwelle hat z. B. der *Schmitt*-Trigger. Der *Schmitt*-Trigger läßt sich so einstellen, daß er bei Spannungsdifferenzen von $\pm$ 0,05 V an der Schaltschwelle exakt schaltet. Über ein Relais wird der Ladestromkreis aufgetrennt. Die Schalthysterese des *Schmitt*-Triggers verhindert das Wiedereinschalten durch den Spannungsrückgang des abgetrennten Akkumulators.

Bild 7.11 zeigt den Stromlaufplan eines solchen selbsttätig abschaltenden Ladegeräts. Den *Schmitt*-Trigger bilden T1 und T2. Die Betriebsspannung für den *Schmitt*-Trigger wird mit D1 stabilisiert. Das ist eine wesentliche Voraussetzung für das genaue Einhalten der Schaltschwelle. Durch die Spannungsteiler (R1 bis R4) im Eingang läßt sich das Gerät im Spannungsbereich von 2 bis 12 V einstellen. Für Klemmenspannungen unter

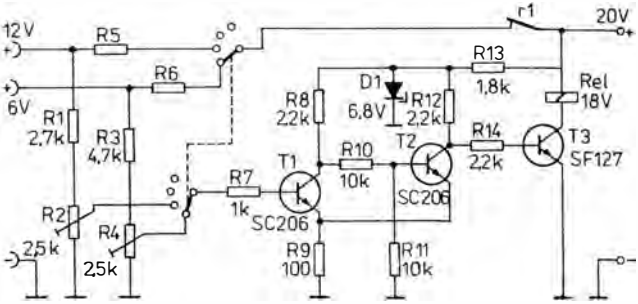
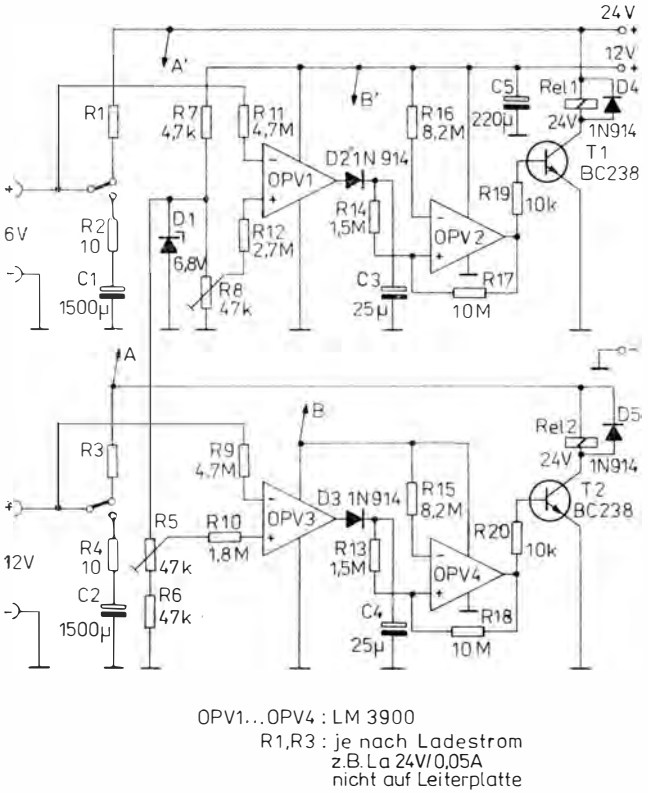


Bild 7.11 Ladeendabschaltung durch *Schmitt*-Trigger

3 V sollte R1 durch eine Drahtbrücke ersetzt werden. Steigt beim Laden die Klemmenspannung, so steigt damit auch die Spannung an der Basis von T1, der bei Erreichen der Schaltschwelle umschaltet. T1 leitet, T2 sperrt, und das Relais zieht an. Das Einhalten der Schaltschwelle hängt von der stabilisierten Spannung für den *Schmitt*-Trigger, aber auch von gleichbleibenden Temperaturbedingungen ab. Für R2 und R4 sollten möglichst gekapselte Ausführungen verwendet werden. Wegen der hohen Schaltgenauigkeit läßt sich dieser Ladeendabschalter für alle Akkumulatorarten verwenden.

Da der Eingangsspannungsteiler umschaltbar ausgelegt wurde, kann der *Schmitt*-Trigger für alle Ladebereiche (2 bis 12 V) verwendet werden. Die Größe von R5 und R6 berechnet man nach Gl. (40) für die jeweilige Klemmenspannung und den erforderlichen Ladestrom. Bei Ladeströmen bis 1 A genügt für Rel ein Kleinrelais. Bei größeren Ladeströmen wählt man Typen mit entsprechend belastbaren Kontaktsätzen aus. Sollen mehrere Akkumulatoren gleichzeitig geladen werden, so benötigt man die entsprechende Anzahl *Schmitt*-Trigger.

Bei gasdichten Akkumulatoren muß das Gerät auf den Punkt vor dem Einsetzen der Gasung bzw. des Überladens eingestellt sein. Da besonders bei gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren an diesem Punkt die Kennlinie recht flach verläuft (s. a. Bild 4.12, Band 2), muß hier mit Sicherheit gearbeitet werden. Man legt den Abschaltpunkt lieber etwas — ungefähr 0,1 V —



OPV1...OPV4 : LM 3900
R1,R3 : je nach Ladestrom
z.B. La 24V/0,05A
nicht auf Leiterplatte

Bild 7.12 Automatisches Ladegerät mit IS

niedriger fest, als daß der Akkumulator durch Überladen gefährdet würde. In der Praxis bedeutet das eventuell eine Kapazitätseinbuße von etwa 10%. Um auch diese Reserve noch auszuschöpfen, wurde ein Ladeverfahren entwickelt, bei dem nicht die Ladekennlinie, sondern die Entladekennlinie als Abschaltkriterium dient.

Durch die Verwendung von Integrierten Schaltkreisen läßt sich das Schaltverhalten eines automatisch abschaltenden Ladegeräts noch besser den Eigenschaften der Akkumulatoren an-

passen. Bei dem Ladegerät nach Bild 7.12 bildet der Vierfach-Operationsverstärker den Spannungsdiskriminator. Dieses Ladegerät, entwickelt von *M. Prammer*, ist ursprünglich zum Laden von gasdichten Nickel-Kadmium-Akkumulatoren des Senders (12 V/500 mAh) und des Empfängers (4,8 V/500mAh) ausgelegt. Bei entsprechender Dimensionierung der Ladestrombegrenzung kann man es auf Grund seines genauen Schaltverhaltens auch zur Ladeendabschaltung ohne Belastungsprobe aller anderen Akkumulatorarten benutzen. Der verwendete IS ist ein Vierfach-Operationsverstärker. Damit können 2 unabhängige Ladestromkreise aufgebaut werden. Die Funktion wird am Beispiel eines Ladekreises erläutert, der zweite Ladekreis arbeitet analog.

Der Operationsverstärker OPV 1 ist als Differenzverstärker geschaltet. Die Z-Diode D1 erzeugt die Vergleichsspannung, die sich mit R4 je nach Ladeschlußspannung genau einstellen läßt und über R6 auf den ⊕-Eingang des OPV 1 geschaltet ist. Am ⊖-Eingang des OPV 1 liegt über R5 die Klemmenspannung des geladenen Akkumulators. Hat der Akkumulator seine Ladeschlußspannung noch nicht erreicht, so ist der Ausgang von OPV 1 im Zustand „H" (High, engl.: hoch). OPV 2 arbeitet infolge der Mitkopplung über R9 als empfindlicher Trigger. Hat der ⊕-Eingang von OPV 2 „H"-Potential, dann ist der Ausgang ebenfalls „H", demzufolge leitet T1, und das Relais ist angezogen.

Hat der angeschlossene Akkumulator seine Ladeschlußspannung erreicht, dann wird der Ausgang von OPV 1 „L" (Low, engl.: tief). C2 entlädt sich über R7 und den ⊕-Eingang in etwa 3 min. Nach Ablauf dieser Zeit kippt auch der Trigger OPV 2 um, und das Relais fällt ab. Der Akkumulator wird mit R1, C1 kapazitiv belastet. Da der Akkumulator bei der ersten Belastung noch nicht auf volle Kapazität aufgeladen ist, sinkt seine Klemmenspannung ab, OPV 1 schaltet um, in der Folge auch OPV 2, und das Relais zieht wieder an. Der Akkumulator wird wieder geladen, bis er die Prüfspannung erreicht hat. Der Wechsel zwischen „Laden" und „Belasten" wiederholt sich so lange, bis der Akkumulator auch bei Belastung die Spannung hält.

Dem kommt entgegen, daß C1 nach mehrmaliger Belastung aufgeladen ist und diese Spannung hält. Damit wird der angeschlossene Akkumulator nur durch den Ladestrom von C1 und

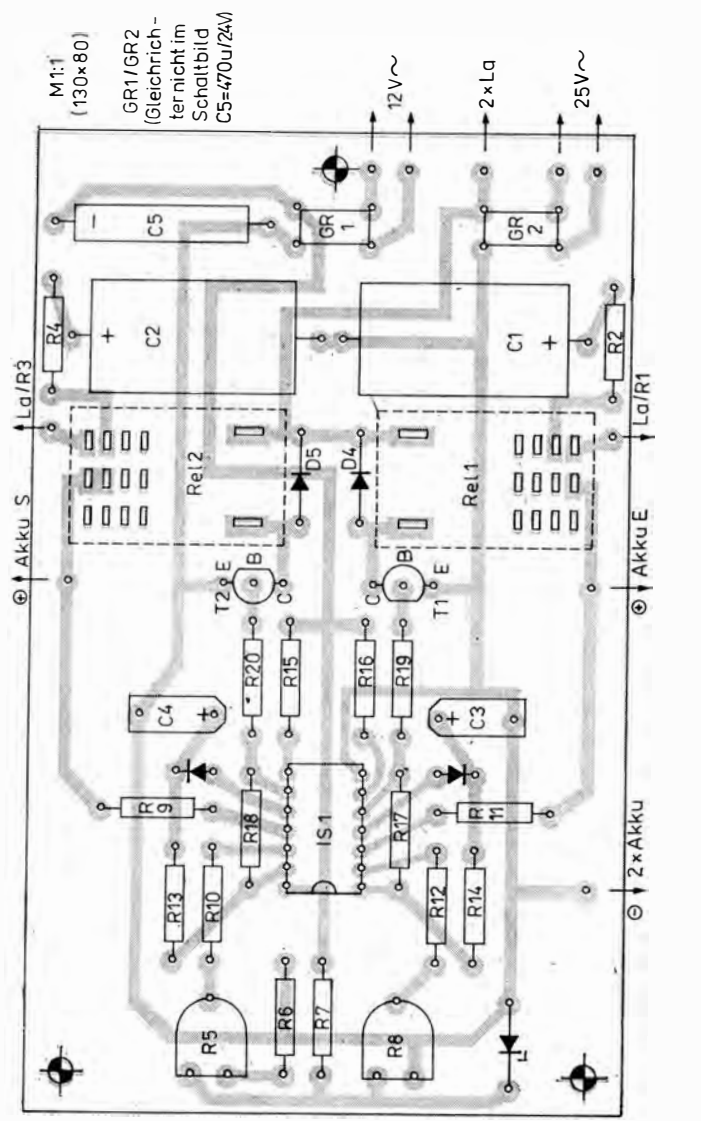


Bild 7.13 Bestückungsplan für das Ladegerät nach Bild 7.12

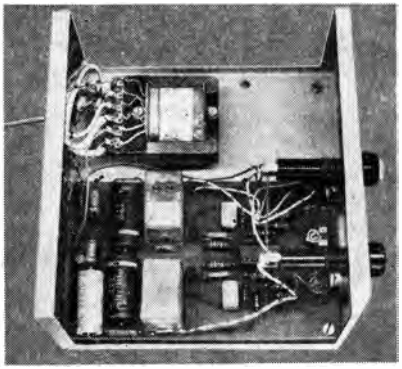


Bild 7.14
Fertiges Gerät — Innenansicht

seine Selbstentladung langsam entladen. Sinkt die Klemmenspannung unter den Vergleichswert, so schalten OPV 1, OPV 2 wieder auf „Laden". Der Akkumulator kann unbegrenzt lange angeschlossen bleiben.
Die Vorteile dieser Schaltungsvariante sind in dem verringerten Bauteileaufwand, der genauen Schaltschwelle und der maximalen Schonung der Akkumulatoren (Belastung nur am Ende des Ladevorgangs, kein Entladen über Spannungsteiler) zu sehen.
Bild 7.13 zeigt den Bestückungsplan und Bild 7.14 die Innenansicht des Geräts.

7.7. Laden mit Strom- und Spannungsbegrenzung (UI-Kennlinie)

Bei Ladegeräten mit *UI*-Kennlinie nutzt man die Eigenschaften der Akkumulatoren aus, während des Ladens Spannung und Stromaufnahme in ausgeprägter Weise zu ändern. Ein typisches Beispiel dafür ist der Blei-Akkumulator. Das Ansteigen der Klemmenspannung am Ladeende wird dazu verwendet, den Ladevorgang in allen Phasen elektronisch zu steuern und damit einen vollautomatischen Ladeprozeß zu erreichen. Dabei ist es gleichgültig, in welchem Ladezustand man den Akkumulator anschließt. Er wird auf die volle Kapazität aufgeladen und ein Überladen verhindert.
Das Ladegerät für *UI*-Ladung nach Bild 7.15 zeichnet sich

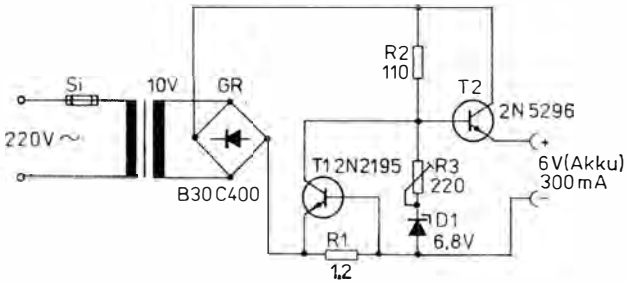


Bild 7.15 Ladegerät mit UI-Kennlinie für 0 bis 0,8 A Ladestrom

durch besondere Einfachheit und geringen Aufwand aus. Der Ladestrom wird von dem Längstransistor T2 gesteuert. Die Vergleichsspannung gewinnt man mit der Z-Diode D1. Das Regelverhalten der Schaltung hängt von der ausreichenden Stromverstärkung des Längstransistors und dem niedrigen dynamischen Innenwiderstand der Z-Diode ab. Um die Schaltung kurzschlußsicher zu machen, sind T1, R1 in die Schaltung eingefügt. Solange der durch den Ladestrom bedingte Spannungsabfall an R1 $I_L R_1 < (0{,}4 \ldots 0{,}5)$ V kleiner als die Steuerspannung von T1 ist, bleibt T1 gesperrt und damit für die Schaltung wirkungslos. Erst wenn die Schleusenspannung von T1 überschritten wird, leitet T1 und sperrt T2. Damit tritt eine wirksame Strombegrenzung ein. Für den Kurzschlußfall muß T2 gut gekühlt werden, da in ihm die gesamte Verlustleistung

$$P_V = 2{,}3 \text{ V} \cdot n I_L, \tag{43}$$

mit P_V — Verlustleistung, n — Anzahl der Zellen, I_L — Ladestrom,
in Wärme umgewandelt wird. Die Strombegrenzung setzt bereits bei $1{,}2 \cdot I_L$ ein. R_1 erhält man dann nach

$$R_1 = \frac{0{,}45 \text{ V}}{1{,}2 \cdot I_L} \cdot \tag{44}$$

Für das Laden von Blei-Akkumulatoren genügt diese Schaltung den Anforderungen.
Ein noch besseres Regelverhalten, vor allem bei einstellbarem Ladestrom, erzielt man mit der Schaltung nach Bild 7.16. Das Gerät ist kurzschlußfest. Der Ladestrom läßt sich im Be-

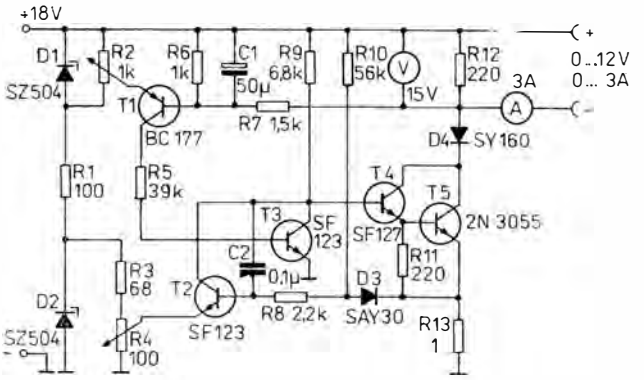


Bild 7.16 Ladegerät mit *UI*-Kennlinie für 0 bis 3 A Ladestrom

reich von 75 mA bis 3 A einstellen, die Ladeschlußspannung liegt zwischen 1,25 V und 13 V. Die Schaltung wurde in [6] veröffentlicht. Bei dieser Schaltung wird der Ladestrom durch den Spannungsabfall an R13 begrenzt. Dieser Spannungsabfall steuert über T2 den Basisstrom der *Darlington*-Kaskade T4, T5, die vom Ladestrom durchflossen wird. Die Strombegrenzung setzt ein, wenn durch den Spannungsabfall an R13 T2 leitet und damit T4, T5 zuregeln. Der Einsatzpunkt der Strombegrenzung läßt sich mit R4 einstellen. Den Wert der Spannungsbegrenzung kann man mit R2 festlegen. Hat der Akkumulator die Ladeschlußspannung und damit den eingestellten Grenzwert erreicht, so leitet T1 und in der Folge auch T3. Dadurch verringert sich der Basisstrom von T4, so daß auch der Ladestrom kleiner wird. Bei weiter steigender Klemmenspannung des Akkumulators sinkt der Ladestrom fast auf den Wert Null. Der Transistor T5 muß auf einem ausreichend dimensionierten Kühlkörper ($R_{th} \geqq 0{,}5$ K/W) montiert werden.

7.8. Schnelladen

Durch die Entwicklung und Anwendung von Sinterzellen (s. Band 2) wurde für den Amateur auch das Schnelladen interessant. Unter Schnelladen versteht man das Laden mit $I_L =$

$(1 \ldots 3) \cdot K_5$, also Ladezeiten von 20 bis 60 min. Durch den Einsatz der Sinterzellen in Elektroflugmodellen erhielt die Schnelladung besondere Bedeutung. Erzielt man z. B. mit einem Elektrosegelflugmodell Flugzeiten von 20 bis 30 min und kann in der gleichen Zeit eine zweite Batterie nachladen, so ist pausenloses Fliegen möglich. Um das zu realisieren, mußten 2 Bedingungen erfüllt sein. Erstens erfordert das auf dem Fluggelände eine entsprechend belastbare Spannungsquelle und zweitens ein praktikables und preiswertes Schnelladeverfahren. Bei Auslegung des Elektroantriebs für 7zellige Batterien ist der 12-V-Kfz-Akkumulator eine entsprechend belastbare Ladespannungsquelle.

Wie im Band 2 dargelegt, muß der Akkumulator mit Sinterzellen im Interesse einer langen Lebensdauer bei Schnelladung nach Erreichen der Volladung abgeschaltet werden. Er ist zwar beim Normalladen „überladesicher", d. h. unbegrenzt ladbar, aber nicht beim Laden mit $I_L = (1 \ldots 3) \cdot K_5$, d. h. beim Schnelladen. Als Kriterium für das Erreichen der Volladung bieten sich an: die Zellentemperatur und die Zellenspannung, da beide bei Ladeende merklich ansteigen, oder die Bestimmung der eingeladenen Ladungsmenge. Auf dieser Grundlage wurden folgende Schnelladearten entwickelt:

— temperaturkontrollierte Schnelladung,
— spannungskontrollierte Schnelladung,
— zeit- (und strom-) kontrollierte Schnelladung.

Die temperaturkontrollierte Schnelladung ermöglicht zwar den Aufbau einfacher Ladegeräte, weist aber außer den Grenzen der Anwendbarkeit für den Ladestrom ($I_L = 1{,}5 \cdot K_5$) und die maximale Kapazität der Zellen ($K_5 = 2$ Ah) auch Unsicherheiten in der Anwendung auf. Letztere rühren daher, daß die Anfangstemperatur, die Umgebungstemperatur, die Zellenanzahl, die Kapazität der Zellen, die Anordnung der Zellen und das Gehäuse („Verpackung") sowie der Einbau im Modell Einfluß auf die Erwärmung und damit die Abschaltung haben. Für den Modellbauer sind daher nur das spannungskontrollierte und das zeitkontrollierte Schnelladen von Bedeutung. Für beide Arten wird im folgenden je ein Beispiel angegeben.

Zeitkontrolliertes Schnelladen

Das zeitkontrollierte Schnelladen ist für den Modellbauer auf

Bild 7.17
Schnelladekabel

Grund seiner Einfachheit und Praktikabilität die meistangewendete Schnelladeart. Beim zeitkontrollierten Schnelladen geht man davon aus, daß die einzuladende Kapazität genau bekannt ist. Am einfachsten ist es dann, vom Ladezustand „Null" auszugehen und immer die Nennkapazität einzuladen. Den Ladezustand „Null" stellt man durch Restentladung her, indem der Akkumulator vor jedem Schnelladen bis zur Entladeschlußspannung von $U_{ZES} = 1{,}0$ V entladen wird. Die Entladeschlußspannung ist belastungsabhängig und sollte auch bei höheren Belastungen nicht unter $U_{ZES} = 0{,}8$ V liegen. Dieses Entladen bis zur Entladeschlußspannung kann durch eingeschalteten Antriebsmotor im Modell oder durch Belastung mit einer Glühlampe (12 V/21 W) erfolgen. Dabei ist die Klemmenspannung zu messen. Man kann den Akkumulator auch mit einer Glühlampe belasten und das Entladen mit einem elektronischen Schalter beenden. Solche Schalter werden im Abschnitt 8. vorgestellt.

Im einfachsten Fall verwendet man für das zeitkontrollierte Schnelladen ein Widerstandskabel (Bild 7.17) oder einen ent-

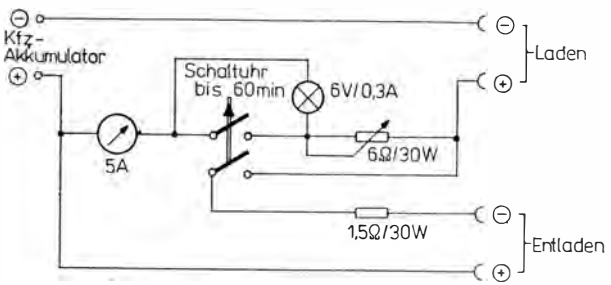


Bild 7.18 Schnelladegerät mit Zeitschalter

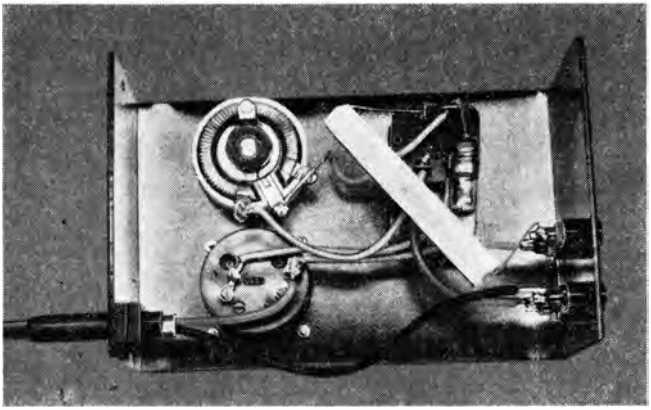


Bild 7.19 Innenansicht eines Schnelladegeräts mit Zeitschalter (Anlage: *Varioprop*)

sprechend dimensionierten Vorwiderstand. Das Kabel oder der Vorwiderstand sind auf die entsprechende Batterie abgestimmt, um den festgelegten Wert des Schnelladestroms einzuhalten. Die Zeit wird am besten mit einem Kurzzeitwecker kontrolliert. Die Anwendung eines Schnelladekabels setzt eine stabile Spannungsquelle (Autoakkumulator 12,3 bis 12,5 V

Bild 7.20 Außenansicht eines Schnelladegeräts mit Zeitschalter (Anlage: *Varioprop*)

bei stehendem Motor!) mit geringem Innenwiderstand (keine weiteren Zuleitungen!) voraus.
Wesentlich einfacher ist es, wenn man Vorwiderstand und Wecker (als Zeitschalter) möglichst noch mit einem Amperemeter zur Stromkontrolle in einem Schnellladegerät zusammenfaßt (Bild 7.18 bis Bild 7.20). Dieses Ladegerät entspricht in seinem Verhalten dem Laden mit W-Kennlinie. Es hat den Vorteil, daß mit dem hochbelastbaren einstellbaren Vorwiderstand Batterien mit wechselnder Zellenanzahl (maximal 7 Zellen) und unterschiedlicher Kapazität geladen werden können.

Beispiel
Ein Elektroflugakkumulator 8,6 V/1,2 Ah soll schnellgeladen werden. Für 30 min Ladezeit ergibt sich ein Schnelladestrom von 2,4 A. Nach 30 min ist der vorher ganz entladene Akkumulator auf 80% der Nennkapazität aufgeladen. Höhere Werte werden im Interesse der Lebensdauer vom Hersteller nicht empfohlen. Soll der Akkumulator auf 100% Nennkapazität aufgeladen werden, dann muß sich der Schnelladung eine mehrstündige beschleunigte Ladung anschließen. Bei der Schaltung nach Bild 7.18 ist diese Möglichkeit vorgesehen, denn nach Ablauf der Uhr fließt ein Ladestrom von etwa 300 mA, mit dem der betrachtete Nickel-Kadmium-Akkumulator noch mehrere Stunden geladen werden kann. Einige Hersteller gestatten das beschleunigte Laden mit $I_L = (0{,}2 \ldots 0{,}3) \cdot K_5$ sogar für die Dauer einiger Tage. Auf jeden Fall sollte man sich darüber aber in den Datenblättern informieren, um Schäden von vornherein auszuschließen.

7.9. Elektronik-Schnelladegerät

Das Schnelladegerät nach Bild 7.18 ist elektrisch wenig aufwendig. Dafür muß aber ein Mangel in Kauf genommen werden: Das Gerät darf nur an den 12-V-Kfz-Akkumulator bei nichtlaufendem Motor angeschlossen werden, damit eine definierte Ladespannung vorliegt. Die Spannungsdifferenz zum Laden ist relativ klein. Bei Ladebeginn beträgt sie 12 V − 7 V = 5 V und bei Ladeende 12 V − 10,5 V = 1,5 V. Da mit Vorwiderstand geladen wird, ändert sich der Ladestrom sehr stark. Beträgt er

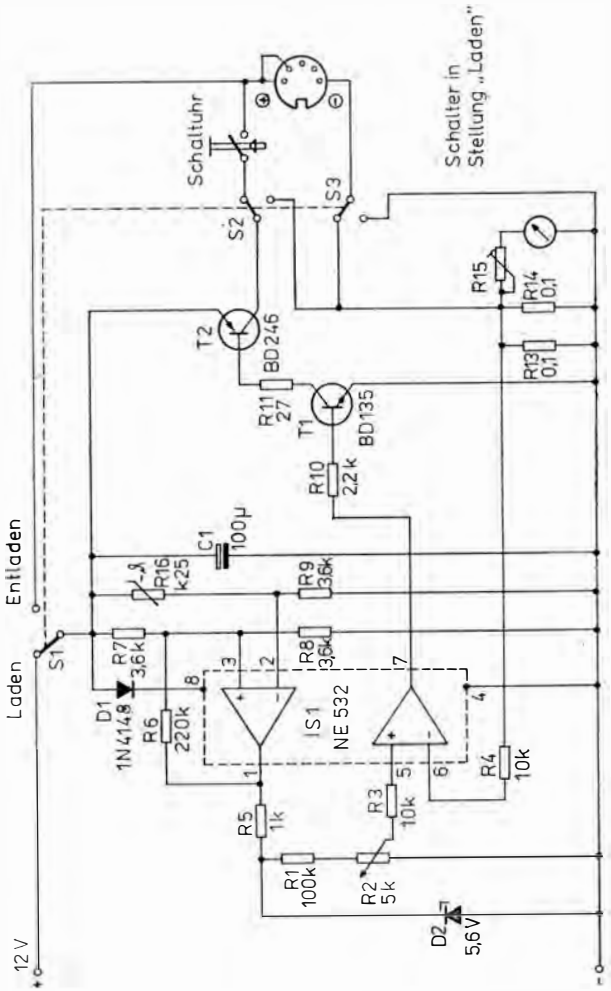


Bild 7.21 Elektronik-Schnelladegerät
(Anlage: *Multiplex*)

bei Ladebeginn $I_L = 4{,}8$ A, so ist der Wert bei Ladeende auf $I_L \approx 1{,}5$ A gesunken. Dieser Umstand erschwert das Abschätzen der eingeladenen „Lademenge", das wichtig für das Volladen, aber auch für die Verhinderung des Überladens ist. Demzufolge stabilisiert man den Ladestrom mit elektronischen Mitteln. Dieser Weg wurde bei dem im folgenden beschriebenen Elektronik-Schnelladegerät (Bild 7.21) beschritten. Dieses Ladegerät hat noch einen weiteren Vorteil, denn es kann zum Entladen der Sinterzellen bis zur Entladeschlußspannung verwendet werden.

In der Stellung „Laden" ist das Gerät am 12-V-Fahrzeugakkumulator angeschlossen. Durch die elektronische Stromkonstanthaltung werden größere Eingangsspannungsschwankungen ausgeglichen, so daß auch bei laufendem Fahrzeugmotor geladen werden kann.

Der OPV 1 des Zweifach-Operationsverstärkers IS1 arbeitet hier als temperaturstabile (R16) Konstantstromquelle für die Z-Diode D2. Die Z-Diode erzeugt die mit R2 einstellbare Referenzspannung, die am nichtinvertierenden Eingang (+) von OPV 2 liegt. OPV 2 arbeitet als Spannungsvergleicher, der die Referenzspannung mit dem Spannungsabfall des Ladestroms an R13, R14 vergleicht. Dadurch wird der Steuerstrom für T1 und T2 und damit auch der Ladestrom konstant gehalten. Durch die Elektronik ist das Gerät überlast- und kurzschlußsicher.

Durch Umschalten auf „Entladen" kann das Gerät auch zum Entladen des Antriebsakkumulators bis zur Entladeschlußspannung verwendet werden. Damit läßt sich das Elektronik-Schnelladegerät recht universell einsetzen.

Ein Mangel der bisher beschriebenen Schnelladeverfahren besteht darin, daß sie an einem Kfz-Akkumulator mit 12 V Klemmenspannung gebunden sind. Die kurze Berechnung läßt erkennen, daß man nur Sinterakkumulatoren mit bis zu 7 Zellen auf diese Weise schnelladen kann. Das Bestreben geht dahin, zur Leistungssteigerung — besonders im Elektroflug — 8- bis 10zellige Sinterakkumulatoren zu verwenden. Für das Laden dieser Akkumulatoren gibt es nur 2 praktikable Verfahren, entweder man teilt den 8zelligen Akkumulator auf und lädt die beiden Teile getrennt, oder man schaltet dem Schnelladegerät einen Spannungswandler vor.

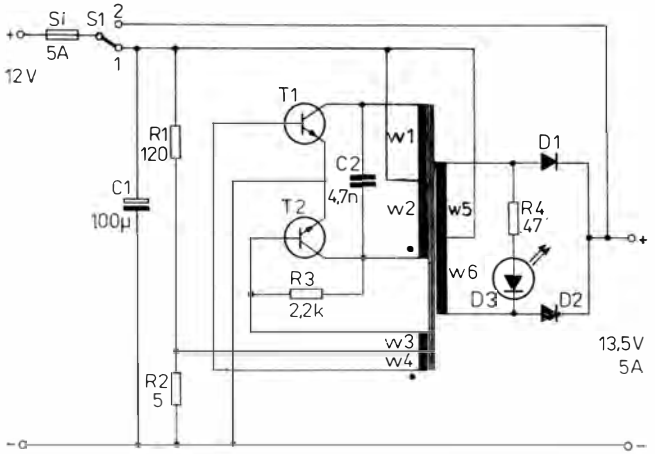


Bild 7.22 Spannungswandler zum Laden von 8zelligen Sinterakkumulatoren (Anlage: *Multiplex*)

Für das Elektronik-Schnelladegerät wurde ein solcher Spannungswandler entwickelt (Bild 7.22). Schaltet man ihn zwischen Kfz-Akkumulator und Schnelladegerät, dann erhöht sich die Ladespannung auf 14 bis 15 V, so daß auch 8zellige und bedingt 10zellige Sinterakkumulatoren schnellgeladen werden.

Der Spannungswandler arbeitet nach dem Prinzip des Transverters. Die erzeugte Gleichspannung wird in Reihe zur Speisespannung des Kfz-Akkumulators geschaltet.

Die Ladespannung ist allerdings lastabhängig. Bei voller Belastung ($I_L = 5$ A) steht aber noch eine Ladespannung von $U_L = 13{,}5$ V zur Verfügung, die ausreicht, um mit einem Schnelladegerät (Bild 7.18 oder Bild 7.21) einen 8zelligen Sinterakkumulator schnellzuladen.

Die Betriebsbereitschaft wird durch die Leuchtdiode D3 angezeigt. Im ausgeschalteten Zustand hat der Spannungswandler

gewissermaßen Durchgang, so daß die Handhabung beim Laden von Batterien mit unterschiedlicher Zellenanzahl erleichtert wird.

Spannungskontrolliertes Schnelladen

Je nach Zellenaufbau und Alter ist die relativ hohe Selbstentladung ein besonderes Zeichen der Sinterzellen. Um daher für einen Hochleistungsantrieb auch tatsächlich über die maximale Kapazität zu verfügen, sollten diese Akkumulatoren erst unmittelbar vor dem Einsatz geladen werden. Unter diesem Aspekt hat das Schnelladen auf dem Modellgelände durchaus seine Berechtigung. Man kann das Schnelladen aber auch zu Hause durchführen. Das sich an das Schnelladen anschließende Normalladen sichert, daß der Akkumulator vor der Fahrt zum Modellgelände auf 100% Kapazität aktiviert wurde. Für eine solche Schnellladung bietet sich der Aufbau eines automatischen Ladegeräts mit Spannungsüberwachung an. In [2] stellte *H. Eichinger* die Schaltung eines solchen Ladegeräts vor (Bild 7.23). Dieses Ladegerät ist für 6 V und 12 V ausgelegt, der Schnelladestrom beträgt $I_{L\,max} = 2$ A, die Abschaltspannung ist temperaturkorrigiert.

Der Operationsverstärker IS 1 wirkt zusammen mit T3 als Konstantstromquelle für den Ladestrom. Die Referenzspannung gewinnt man mit der Z-Diode D1. Mit R8 ... 10 wird der Ladestrom eingestellt. Die Dioden D4 und D5 verhindern, daß sich der Akkumulator bei ausgeschaltetem Gerät über den Inversbetrieb von T3 entlädt. IS 2 ist zur Spannungskontrolle und damit als Abschaltautomatik geschaltet. Bei Erreichen der Ladeschlußspannung von $U_{ZLS} = 1{,}6$ V bei Schnelladung schaltet IS2 von Schnell- auf Dauerladen um. Der Dauerladestrom wird durch die Größe von R11 ... 13 festgelegt. IS2 ist als Spannungsvergleicher und Schaltverstärker geschaltet. Seine Referenzspannung wird ebenfalls von D1 abgeleitet und mit R18 temperaturkorrigiert. Erreicht die Ladespannung den eingestellten Abschaltpunkt, so schaltet IS2 seinen Ausgang auf Masse. Dadurch sperrt T2 und schaltet über IS1 und T3 den Schnelladestrom ab. Die Leuchtdiode zeigt das Umschalten von Schnell- auf Dauerladen an. Da IS2 auch seine Referenzspannung am (+)-Eingang auf Masse legt, entsteht damit eine Schalthysterese, die das Wieder-

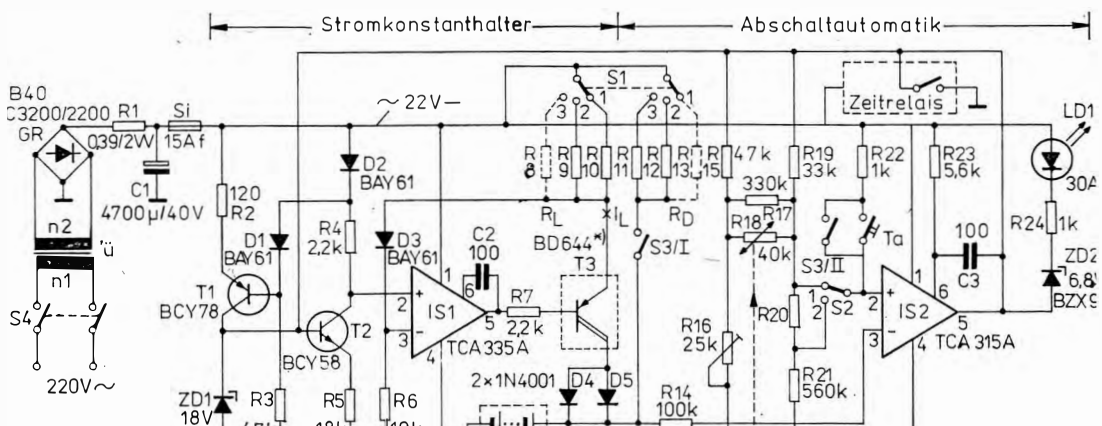


Bild 7.23 Schnellladegerät mit automatischer Abschaltung

Übertrager ü
Kern M 85 b
n1: 656 Wdg. 0,4 mm CuL
n2: 85 Wdg. 1,2 mm CuL

S1: Kapazitätsschalter
S2: Spannungsschalter
Stellung 1: 12 V
Stellung 2: 6 V

S3: Wahlschalter Schnell-/Normalladung
S4: Netzschalter
*) Kühlkörper mit $R_{th} \leq 8$ K/W
($T_{U\,max} = 50$ °C)

einschalten der Schnelladung verhindert. Die Schalter haben folgende Funktion:

S1 — Umschalten auf verschiedene Schnell- und Dauerladeströme, festgelegt durch die Werte von R8 ... 10 und R11 ... 13.

S2 — Umschalten auf 6 V oder 12 V Ladebereich.

$S3_{II}$ — Durch Schließen wird die Abschaltautomatik ausgeschaltet. Dann kann mit dem Gerät auch zeitbegrenzt normalgeladen werden.

$S3_{I}$ — Durch Schließen erfolgt Umschaltung auf Schnellladung.

T — Drücken leitet das Schnellladen ein.

Zeitrelais — Begrenzt das Normalladen zeitlich.

Für das Normalladen (S3 geschlossen) muß einer der Widerstände R8 ... 10 nach Gl. (40) entsprechend dimensioniert sein.

Die vorgestellten Schnelladeverfahren lassen sich nur für Sinterzellen bis $K_5 = 2$ Ah anwenden. Bei Zellen mit größerer Kapazität müssen wegen des höheren inneren Spannungsabfalls (begrenzter Querschnitt der inneren Ableitungen) und der verringerten Wärmeableitung andere Schnelladeverfahren angewendet werden, die aber für den Modellbauer weniger von Interesse sind.

7.10. Reaktivierung von Primärzellen

Die Nutzungsdauer von Primärzellen läßt sich durch Reaktivierung wesentlich erhöhen. Voraussetzung ist jedoch, daß der Zinkmantel keine Löcher aufweist und der Elektrolyt nicht ausgetrocknet ist. Ferner dürfen die Zellen nicht tiefentladen sein (nicht unter 1,3 V je Zelle). Am besten lassen sich Kohle-Zink-Zellen mit Braunstein-Depolarisator reaktivieren. Zellen mit Aktivkohle-Depolarisator sind nur bedingt reaktivierbar, da der in der Aktivkohle angelagerte Sauerstoff mit der Zeit entweicht. Primärzellen werden mit einem Gleichstrom, dem ein Wechselstrom überlagert ist, reaktiviert. Das erreicht man, indem parallel zum Gleichrichter ein Widerstand geschaltet wird (Bild 7.24). In der Literatur werden zur Dimensionierung

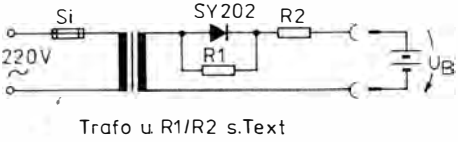


Bild 7.24 Reaktivierung von Primärelementen

der beiden Widerstände recht unterschiedliche Angaben publiziert, die aber alle zu etwa folgenden Ergebnissen führen:
Mit R2 stellt man den Ladestrom auf

$$I_L = 0{,}01 \cdot I_K \tag{45}$$

ein, mit I_L — Ladestrom, I_K — Kurzschlußstrom der Zelle laut Datenblatt.
R1 hat dann etwa den Wert

$$R_1 = 10 \cdot R_2. \tag{46}$$

U sollte aus Gründen der Berührungssicherheit eine Spannung unter 42 V sein, aber nicht kleiner als

$$U = 1{,}5 \cdot U_B. \tag{47}$$

Für den Wert von R2 erhält man dann

$$R_2 = \frac{U - U_B}{0{,}01 \cdot I_K}. \tag{48}$$

Beispiel
Es sollen 6 Zellen R 20 reaktiviert werden. Der Kurzschlußstrom beträgt laut Datenblatt $I_K \approx 9$ A. Man erhält

$$U = 1{,}5 \cdot 6 \cdot 1{,}5 \text{ V} = 13{,}5 \text{ V}.$$

Die Sekundärspannung des Transformators wird zu 20 V gewählt. Um gegebenenfalls auch die doppelte Zellenanzahl laden zu können, legt man die Sekundärwicklung für den doppelten Strom

$$I = 2 \cdot I_L = 0{,}02 \cdot I_K = 0{,}180 \text{ A}$$

aus. Damit wird

$$R_2 = \frac{20 \text{ V} - 9 \text{ V}}{0{,}01 \cdot 9 \text{ A}} = \frac{11 \text{ V}}{0{,}09 \text{ A}} \approx 120\,\Omega$$

und

$$R_1 = 10 \cdot 120\,\Omega = 1200\,\Omega.$$

Die Belastbarkeit der Widerstände ergibt sich zu

$$P_2 = I_L^2 \cdot R_2, \tag{49}$$
$$P_2 = (0{,}09\ \mathrm{A})^2 \cdot 120 \cdot \Omega = 0{,}97\ \mathrm{W} \approx 1\ \mathrm{W}$$

und

$$P_1 = \frac{U_B^2}{R_1}. \tag{50}$$

Da U_B minimal 1,3 V je Zelle betragen kann, folgt

$$P_1 = \frac{(12\ \mathrm{V})^2}{1200\ \Omega} = 0{,}12\ \mathrm{W} \approx 1/4\ \mathrm{W}.$$

Damit ergeben sich

$$R_1 = 1200\,\Omega/0{,}25\ \mathrm{W},$$
$$R_2 = 120\,\Omega/1\ \mathrm{W}.$$

Bei dieser Dimensionierung der Schaltung kann man auch 5 oder 7 Zellen anschalten, ohne sie zu beschädigen. Die Reaktivierung wird beendet, wenn die Zellenspannung auf 2 V angestiegen ist. Bei Belastung der Zellen sinkt die Spannung dann schnell auf den Nennwert 1,5 V. Da der Transformator der teuerste Bauteil des Reaktivierungsgeräts ist, baut man möglichst 2, eventuell sogar 3 parallele Zweige (D1, R1, R2) auf. Dazu wird die Sekundärwicklung des Transformators gleich mit dem entsprechenden Querschnitt gewickelt. Um in der Praxis auch tatsächlich den erwarteten Effekt zu erzielen, ist folgendes zu beachten:

- Der Zinkmantel der Zellen darf nicht beschädigt und kein Elektrolyt ausgelaufen sein.
- Die Zellen dürfen nicht tiefentladen sein; untere Grenze der Entladespannung sind 1,3 V je Zelle.
- Die Zellen sind möglichst bald nach der Belastung zu reaktivieren.
- Die reaktivierten Zellen sind nur begrenzt lagerfähig.
- Bei Beachtung der gegebenen Hinweise können Primärzellen bis zu 20mal reaktiviert werden.

8. Tiefentladungsschutz

Werden einzelne Akkumulatorzellen tiefentladen, d. h. bis zur Kapazität $K_5 = 0$ bzw. Klemmenspannung $U_Z = 0$, so ist das bei bestimmten Arten ohne schädliche Folgen (Nickel-Kadmium-Akkumulator). Sind aber mehrere Zellen zu einer Batterie zusammengeschaltet, so erreicht (erreichen) auf Grund der immer vorhandenen Kapazitätsunterschiede eine (oder einige) Zelle(n) eher den Wert $K_5 = 0$. Wird die Batterie weiterbelastet, dann fließt der Entladestrom auch durch die tiefentladenen Zellen und polt diese um. Diese Umpolung ist aber mit bleibenden Schäden für die Zelle verbunden und muß daher auf jeden Fall vermieden werden. Bei den Sinterzellen wurde durch Einfügen der antipolaren Masse und der Entladereserve das Auftreten von bleibenden Schäden verhindert. Das gilt aber nur für den Nennentladestrom. Bei Hochstromentladungen sollte im Interesse der Lebensdauer diese „Umpolreserve" nicht in Anspruch genommen werden. Prinzipiell empfiehlt es sich, bei allen Akkumulatorarten Umpolungen bzw. Tiefentladungen zu vermeiden.
Die Tiefentladung setzt unterhalb der Entladeschlußspannung ein. Diese ist zwar lastabhängig, sie hat aber für jede Akkumulatorart einen typischen Wert. Es gelten die Richtwerte in Tabelle 8.1. Damit die angegebenen Werte bei der Zusammenschaltung von Zellen zu Batterien nicht unterschritten wer-

Tabelle 8.1.
Richtwerte für die Entladeschlußspannung der einzelnen Akkumulatorarten

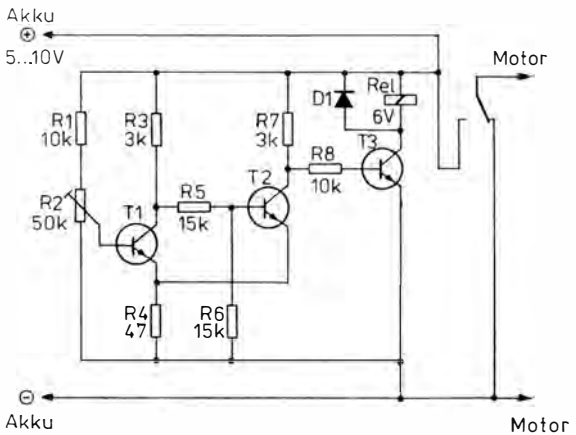
Strom I_E	NiCd-Massezelle	NiCd-Sinterzelle	Pb	AgZn
$0{,}1 \cdot K_5$	1,0	1,0	1,7	1,0
$1{,}0 \cdot K_5$	1,0	1,0	1,65	1,0
$5{,}0 \cdot K_5$	—	0,9	1,60	1,0

alle Spannungsangaben in V

den, kann man im Modell einen automatischen Schalter als Tiefentladungsschutz einbauen.

8.1. Tiefentladungsschutzschalter

Der Tiefentladungsschutzschalter hat die Aufgabe, den Antrieb bei Erreichen des für den Akkumulator typischen Wertes der Entladeschlußspannung abzuschalten. Für diese Aufgabe läßt sich der *Schmitt*-Trigger anwenden (Bild 8.1). Mit R2 kann der Abschaltpunkt auf den Wert der Entladeschlußspannung eingestellt werden. Die Funktion des *Schmitt*-Triggers entspricht der Schaltung der Ladeendabschaltung nach Bild 7.11, nur mit dem Unterschied, daß man beim Tiefentladungsschutz mit der fallenden Spannung schaltet. In der angegebenen Dimensionierung läßt sich der Tiefentladungsschutzschalter von 4,8 bis 10 V einsetzen. Für höhere Spannungen (10 bis 17 V) muß ein 12-V-Relais verwendet und der Wert von R1 verdoppelt werden. Alle anderen Werte bleiben unverändert. Die Größe des gemein-



T1,T2 : SF132, SC236 o.ä.
T3 : SF126
D1 : SAY12

Bild 8.1 Tiefentladungsschutz mit *Schmitt*-Trigger

samen Emitterwiderstands R4 bestimmt die Hysterese, also die Differenz zwischen Einschalt- und Ausschaltspannung. Diese Schalthysterese ist für die einwandfreie Funktion der Schaltung wichtig.

Der Tiefentladungsschutzschalter muß die Einschaltung des Motors bei voll, bei halb und bei viertel geladener Antriebsbatterie ermöglichen, aber bei Entladeschluß sicher abschalten. Die Klemmenspannung für Entladeschluß ist wegen des inneren Spannungsabfalls aber lastabhängig. Sie wird bei starker Belastung kleiner (je nach Angaben des Herstellers 0,5 bis 0,75 V je NiCd-Zelle) als bei schwacher Belastung (etwa 1,0 V je NiCd-Zelle) sein. Schaltet man nun die starke Belastung ab, dann steigt die Klemmenspannung wieder, denn der innere Spannungsabfall fällt ebenfalls weg.

Ist die Schalthysterese des Tiefentladungsschutzschalters zu klein, so wird er durch den Spannungsanstieg wieder eingeschaltet. Da dann die Klemmenspannung sofort wieder zusammenbricht, schaltet er wieder aus, man sagt, die Schaltung schwingt. Dieser Wechsel von AUS- und EIN-Schalten führt bei den Antriebsteilen, dem Motor, dem Schalter und den Batterien zu starkem Verschleiß. Das Schwingen kann außerdem starke Funkstörungen verursachen; es muß auf jeden Fall vermieden werden. Da die Differenz vom Leerlaufwert und Lastwert der Entladeschlußspannung vom Antrieb und dessen Belastung abhängt, sollte die Hysterese dem konkreten Fall durch Ändern von R4 angepaßt werden. Eine Vergrößerung von R4 ergibt eine größere Hysterese.

Man erhält etwa folgende Richtwerte:

$R_4 = 120\,\Omega \triangleq 1{,}4$ V,

$R_4 = 47\,\Omega \triangleq 0{,}5$ V,

$R_4 = 22\,\Omega \triangleq 0{,}1$ V

für $U_B = 8{,}4$ V.

Es handelt sich tatsächlich nur um Richtwerte, die außerdem noch von der Stufenverstärkung des *Schmitt*-Triggers, also den Stromverstärkungsfaktoren der Transistoren, abhängen. In der Praxis können also durchaus größere Abweichungen von den Angaben auftreten.

Den Tiefentladungsschutz kann man schnell auf einer kleinen Lochrasterplatte, wie sie im Handel angeboten wird, aufbauen (Bild 8.2). Zusammen mit dem Relais erhält die Elektronik

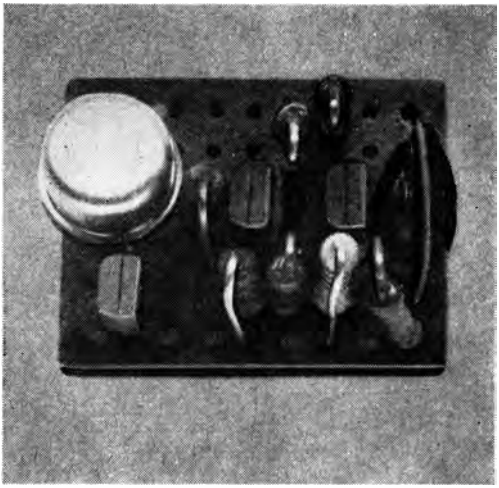
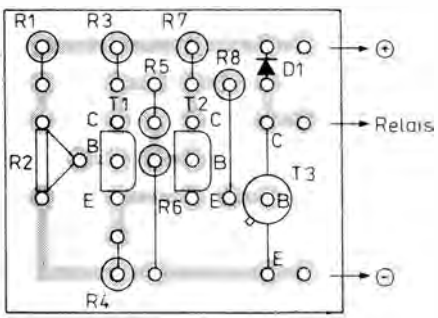


Bild 8.2 Musteraufbau des Tiefentladungsschutzes auf Lochrasterplatte

ein kleines Gehäuse. Die Leiterführung des Tiefentladungsschutzschalters entsprechend Bild 8.3 und Bild 8.4 kann auch als Vorlage für eine selbstangefertigte Leiterplatte dienen. Dieser Tiefentladungsschutzschalter wurde zuerst für die An-



M 2:1 (20×22,5)

Bild 8.3 Bestückungsplan des Tiefentladungsschutzes

wendung im Modell entwickelt, er läßt sich aber auch als externes Entlade- oder Kapazitätsmeßgerät verwenden.

Im Modell wird der Tiefentladungsschalter zwischen Akkumulator und Antriebsmotor eingeschaltet. Soll der Motor bei Stellung „AUS" abgebremst werden, um z. B. beim Elektroflug das Anklappen der Klappluftschraubenblätter zu unterstützen, so ist der Ruhekontakt des Relais, wie in Bild 8.1 angegeben, geschaltet. Soll der Motor nicht gebremst werden, dann bleibt der Ruhekontakt unbelegt. Auf Grund der Schalthysterese des *Schmitt*-Triggers schaltet er nur bei geladenem Akkumulator ein. Selbst das geringfügige Ansteigen der Akkumulatorspannung nach dem Abschalten des Motors genügt nicht, um den Tiefentladungsschutz wieder einzuschalten.

Dieses Verhalten hat einige praktische Konsequenzen. Wenn beim Flugmodell der Tiefentladungsschutz anspricht, hat man meist noch Zeit und Flughöhe, das Modell sicher zu landen. Anders liegen die Verhältnisse beim Schiffsmodell. Wird hier der Antrieb durch den Tiefentladungsschutz auf einem schwerzugänglichen oder sogar offenen Gewässer abgeschaltet, so

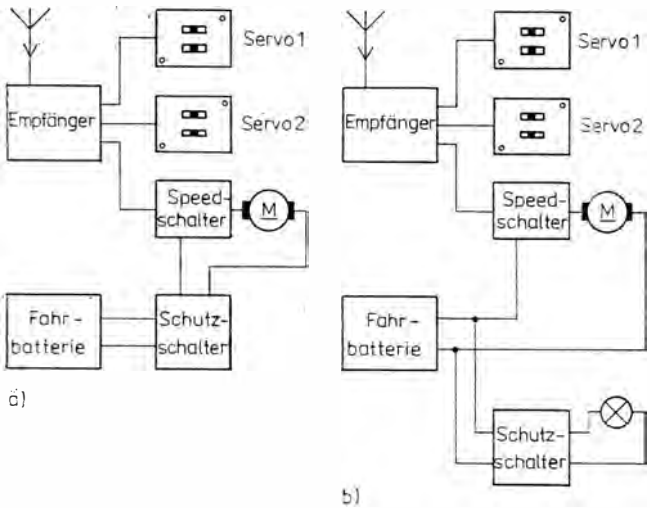


Bild 8.4 Anwendung des Tiefentladungsschutzes; a — Flugmodell, b — Schiffsmodell

besteht die Gefahr des Modellverlusts. In diesem Fall ist es also günstiger, mit dem Tiefentladungsschutz ein optisches (Warnlampe, am besten ein Blinklicht) oder ein akustisches Signal auszulösen (Bild 8.4). Das ist dann das Zeichen, den Modellbetrieb abzubrechen und die Akkumulatoren nachzuladen. Dazu stellt man den Tiefentladungsschutz eben nicht genau auf die Entladeschlußspannung, sondern 0,1 bis 0,2 V je Zelle höher ein.

Die zweite Anwendung des Tiefentladungsschutzschalters als externes Gerät ist nicht minder interessant. Es ist eine gute Ergänzung zum Schnelladegerät (zeitkontrolliertes Schnelladen). Wer aus Gewichtsgründen den Tiefentladungsschutz nicht im Modell einbauen will, der kann die Restentladung der Akkumulatoren mit diesem externen Gerät auch vor jedem Schnelladen recht einfach durchführen. Die Schaltung nach Bild 8.1 wird dazu etwas modifiziert (Bild 8.5) und als Entladegerät aufgebaut (Bild 8.6 und Bild 8.7).

Damit sich das Entladegerät für mehrere Klemmenspannungen anwenden läßt, sind im Unterschied zu dem nach Bild 8.1 4 Spannungsteiler im Eingang des *Schmitt*-Triggers vorgesehen. Außerdem ist, anders als bei der Anwendung im Modell, die Betriebsspannung für den *Schmitt*-Trigger über einen Arbeitskontakt des Relais geführt. Dadurch erreicht man, daß der *Schmitt*-

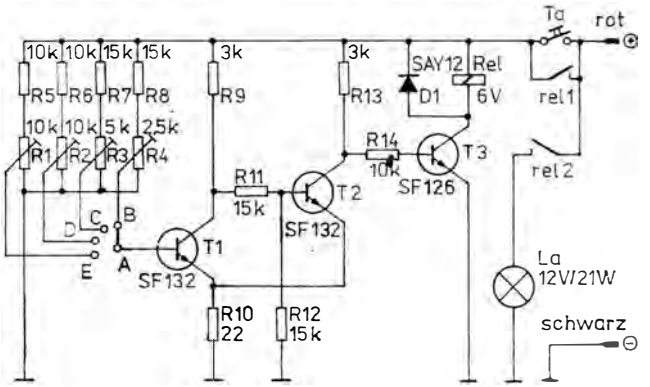


Bild 8.5 **Entladegerät**

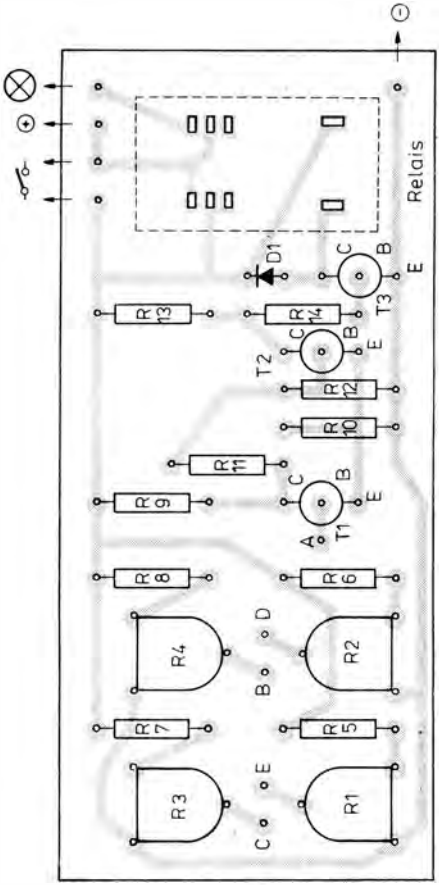
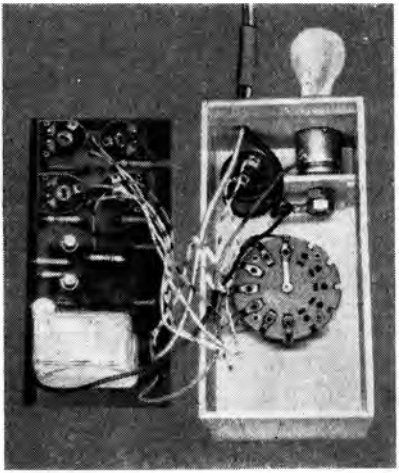


Bild 8.6
Bestückungsplan des Entladegeräts

Trigger ebenfalls abgeschaltet wird und sich der Akkumulator nach Abschalten des Lastwiderstands nicht noch weiter über den *Schmitt*-Trigger entladen kann. Diese Maßnahme erfordert den zusätzlichen Einbau eines Drucktasters.

Im vorliegenden Fall ist der Tiefentladungsschutzschalter für die 4 gebräuchlichen Spannungswerte 4,8 V; 7,2 V; 8,4 V und 9,6 V entworfen. Die Abschaltspannungen stellt man mit den

a)



b)

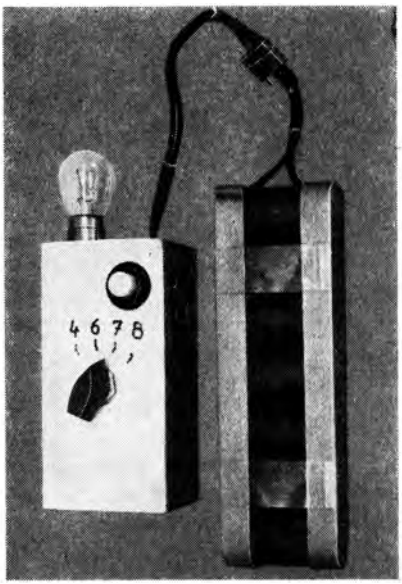


Bild 8.7
Musteraufbau des Entladegeräts;
a — Innenaufbau,
b — Außenansicht

Einstellreglern (R1 bis R4) genau auf die vorgesehenen Werte ein. Die Handhabung des Geräts ist unkompliziert. Der Akkumulater wird über die Steckverbindung angeschlossen und der Drucktaster betätigt. Die Glühlampe belastet den Akkumulator so lange, bis die Entladeschlußspannung erreicht ist und der *Schmitt*-Trigger abschaltet.

Nach 1 bis 2 Jahren Benutzung ist es im Interesse der Betriebssicherheit des Antriebs angeraten, die Kapazität der Antriebsakkumulatoren zu überprüfen (s. Band 2). Das gilt für Blei- wie für Nickel-Kadmium-Akkumulatoren gleichermaßen. Die nutzbare Kapazität eines Akkumulators wird bestimmt, indem man ihn bis zur Ladeschlußspannung auflädt, 60 bis 120 min stehenläßt und ihn dann mit dem Nennstrom

$I_E = 0{,}05 \cdot K_{20}$ (für 20stündige Entladung bei Pb-Akkumulatoren),

$I_E = 0{,}1 \cdot K_{10}$ (für 10stündige) bzw.

$I_E = 0{,}2 \cdot K_5$ (für 5stündige Entladung bei NiCd-Akkumulatoren)

belastet.

Für diesen Zweck muß die Glühlampe des Entladegeräts in der Regel gegen schwächere ausgetauscht werden. Die Leistung der Lampe hängt von dem fließenden Entladestrom ab und berechnet sich nach

$$P_{La} = I_E U_B, \tag{51}$$

mit P_{La} — Leistung der Lampe, I_E — Nennentladestrom, U_B — Nennspannung der Batterie.

Mit dem Entladegerät kann man den Kapazitätsmeßvorgang gewissermaßen automatisieren. Das Entladegerät schaltet außer sich selbst noch eine angeschlossene elektrische Uhr. Dabei führt man den Uhrenstromkreis über einen freien Arbeitskontakt des Relais. Wenn das Entladegerät einschaltet, dann schließt der Arbeitskontakt, und mit dem Entladen läuft die Uhr an. Sie bleibt stehen, wenn das Entladegerät bei Erreichen der Entladeschlußspannung selbständig abschaltet. Die nutzbare Kapazität errechnet man nach

$$K_{nutz} = I_E t_{ent}, \tag{52}$$

mit K_{nutz} — nutzbare Kapazität, I_E — Entladestrom, t_{ent} — Entladezeit.

Wird als Belastungswiderstand eine Glühlampe verwendet, so ist der mittlere Entladestrom auf Grund der Kaltleitereigenschaft der Lampe annähernd konstant.

Nimmt man zur Belastung einen ohmschen Widerstand, so schwankt der mittlere Entladestrom zwischen dem hohen Anfangswert und dem niedrigen Endwert. Das rührt daher, daß je nach Akkumulatorart und Zustand die Entladespannung des auf volle Kapazität aufgeladenen Akkumulators erheblich über dem Wert der Entladeschlußspannung liegt (s. Band 2).

Für diesen Fall muß I_E nach

$$I_E = \frac{I_{E\,anf} + I_{E\,schluß}}{2}, \tag{53}$$

mit I_E — mittlerer Entladestrom, $I_{E\,anf}$ — Anfangsentladestrom, $I_{E\,schluß}$ — Schlußentladestrom,

berechnet werden, um keinen größeren Fehler bei der Kapazitätsmessung zu begehen.

8.2. Elektronikschalter Volt-Controller

Eine ganz ähnliche Konzeption liegt dem Elektronikschalter *Volt-Controller* zugrunde (Bild 8.8). Dieser *Volt-Controller* wurde als Zubehör für die *Varioprop*-Fernsteueranlage entwickelt. Da er aber kein unmittelbarer Bestandteil der Fernsteueranlage ist bzw. nicht an sie angeschaltet wird, kann er im Prinzip bei jedem Antrieb eingesetzt werden. Auch im *Volt-Controller* wird der *Schmitt*-Trigger als Spannungsdiskriminator verwendet. Die Besonderheit ist hier der Kondensator C1. Er wirkt gewissermaßen als Puffer und damit schaltverzögernd. Treten z. B. durch Schaltvorgänge bzw. Hochlaufvorgänge des (oder der) Antriebsmotors(en) kurzzeitige Spannungseinbrüche ein, so spricht der *Volt-Controller* infolge seiner Schaltträgheit noch nicht an. Das relativ langsame Absinken der Klemmenspannung zum Entladeschluß führt aber zum sicheren Abschalten. Die in Abschnitt 8.1. gegebenen praktischen Hinweise gelten auch für die Anwendung des *Volt-Controller*.

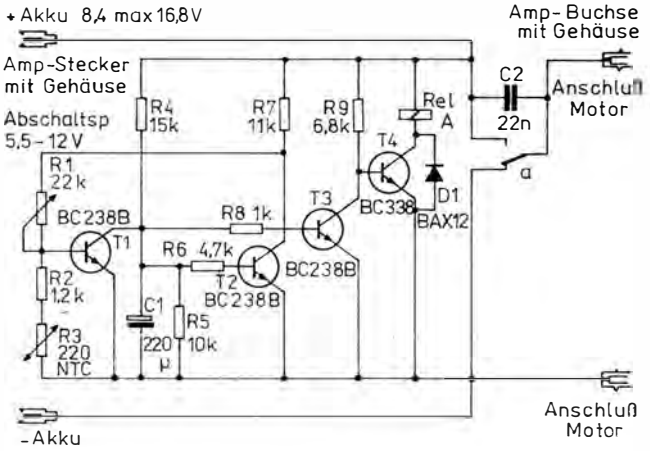


Bild 8.8 Tiefentladungsschutzschalter *Volt Controller*

8.3. Elektronikschalter mit Tiefentladungsschutz

Bei diesem Elektronikschalter handelt es sich im Prinzip um einen EIN-Schalter (Speedschalter), wie er in Band 1 beschrieben wurde. Allerdings weist die Schaltung (Bild 8.9) 2 interessante Einzelheiten auf. Erstens wird die Versorgungsspannung für Empfänger und Servos aus der Fahr- bzw. Flugbatterie gewonnen, und zweitens ist der Schalter mit einem einfachen Tiefentladungsschutz kombiniert. Der Elektronikschalter wurde von *L. Retzbach* entwickelt und in [19], H. 10/78, S. 694, veröffentlicht.

Auf dem Stromlaufplan erkennt man den Referenzgenerator, gebildet aus Gatter I und II, sowie die Vergleichsstufe, gebildet aus Gatter III und IV. Der Differenzimpuls gelangt über Diode D1 auf den Schalttransistor T1.

Kondensator C6 dehnt den Differenzimpuls. Die Besonderheit der Schaltung ist der Spannungsdiskriminator. Solange die Klemmenspannung der Antriebsbatterie größer als U_Z (von D4) ist, fällt an R5 eine Spannung ab, die über R4 die Diode D3 sperrt. Damit wird die Spannung an der Basis von T1 nicht beeinflußt. Sinkt nun die Spannung der Antriebsbatterie unter

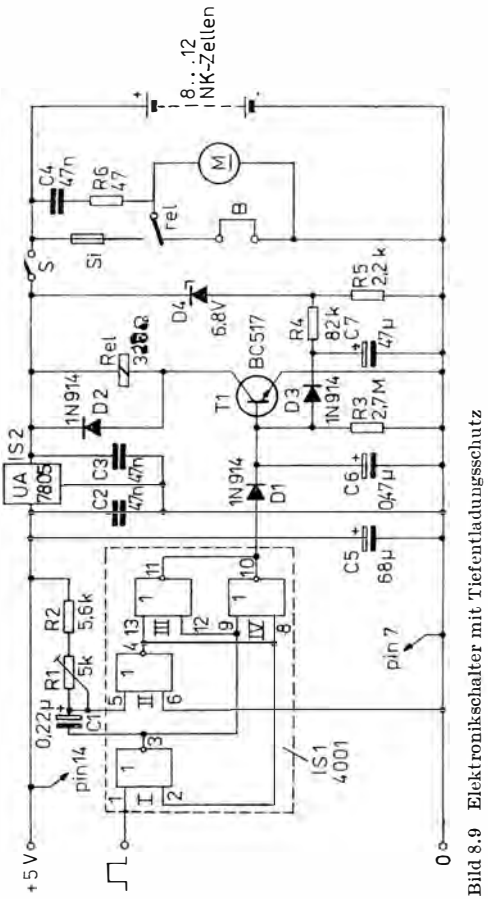


Bild 8.9 Elektronikschalter mit Tiefentladungsschutz

($U_Z + U_F$), so sperrt D4, D3 wird leitend, und C6 entlädt sich über D3, R4, R5. Der Transistor sperrt, das Relais fällt ab und schaltet den Motor aus.

Durch die Bemessung von R4, C7 wird beim Schalten des Relais infolge Spannungsrückgangs eine Schaltverzögerung erreicht. Bei der angegebenen Dimensionierung beträgt die Verzögerung etwa 2 s. Das ist aus folgendem Grund wichtig: Nach dem Ab-

schalten des Motors steigt die Klemmenspannung der Antriebsbatterie wieder und würde über T1 und über das Relais den Motor nach sehr kurzer Zeit wieder einschalten. Diese Umschaltvorgänge sind wegen des damit verbundenen Verschleißes an Relais, Motor und Antrieb unerwünscht. Diese 2 s sind praktisch die Überlegungspause für den Piloten, den Steuerknüppel am Sender auf „AUS" zu stellen und damit den Motor endgültig abzuschalten. 2 s reichen völlig aus, um das Abschalten des Antriebs am Modell zu erkennen.

Die verblüffend einfache Schaltungslösung rechtfertigt diesen Schönheitsfehler.

Die zweite Raffinesse der Schaltung ist der Spannungsregler IS2, mit dem aus der Antriebsspannung eine konstante Versorgungsspannung von 5 V für Empfänger und Servos gewonnen wird. Dieser IS ist bis 1 A belastbar (für Eingangsspannungen zwischen 7 V und 35 V). Er sollte auf einem Kühlkörper (15 cm^2) montiert sein. Die Relaiskontakte schalten unter Last; sie werden mit C4, R6 entstört.

Die Brücke „B" sorgt für Motorstillstand nach dem Abschalten (wichtig bei Klappluftschrauben). Sie wird nur bei Bedarf eingelötet.

Damit diese Form der Spannungsversorgung für Empfänger und Servos auch ihren Zweck erfüllt, gelten für die Antriebsbatterie die gleichen Forderungen wie für die separate Empfängerbatterie (sicherer Einbau, verpolungs- und kontaktsichere Steckverbindungen, Batterie regelmäßig prüfen). Die Sicherung Si muß unbedingt im Antriebsstromkreis eingefügt sein. Sie hat zusätzlich die Empfangsanlage gegen Batteriekurzschlüsse (z. B. bei Motorblockierung) und damit Spannungsausfall zu schützen.

9. Kontaktlose elektronische Drehzahlmesser

Aus den Darlegungen zum Betriebsverhalten sowie zur Abstimmung des Elektromotors auf das konkrete Antriebsproblem geht die Bedeutung der Drehzahlmessung hervor. Sie ist neben Strom-, Spannungs- und Drehmomentmessung unerläßlich, um Kennlinien aufzunehmen und die Kennwerte bzw. das Verhalten des Elektromotors richtig zu beurteilen. Bei den zum Teil nur kleinen Leistungen, die die Motoren abgeben, scheidet die mechanische oder auch elektromechanische Drehzahlmessung aus, da diese Verfahren den Motor belasten und damit das Meßergebnis verfälschen. Dagegen kann vom Amateur die kontaktlose fotoelektrische Drehzahlmessung durchaus angewendet werden.
Bei diesem Verfahren wird ein drehendes Teil des Antriebs, das Helligkeitsschwankungen hervorruft, in der Nähe des Fotowiderstands angeordnet und verursacht in ihm Widerstandsänderungen im Takt der Helligkeitsschwankungen. Diese Widerstandsänderungen werden in elektrische Impulse umgewandelt. Für eine einwandfreie Messung müssen die Impulse verstärkt und geformt werden. Daher läßt man die Impulse einen Verstärker und einen Trigger durchlaufen. An seinem Ausgang stehen dann exakte Rechteckimpulse gleicher Amplitude für die Messung zur Verfügung. Die Impulse, also die eigentliche Messung, können dann analog (mit Zeigerinstrument) oder digital (mit Ziffernanzeige) gewählt werden.
Als erste Variante wird ein Drehzahlmesser mit analoger Anzeige vorgestellt.

9.1. Kontaktloser elektronischer Drehzahlmesser mit analoger Anzeige

Der kontaktlose elektronische Drehzahlmesser mit analoger Anzeige, im weiteren kurz als analoger Drehzahlmesser bezeichnet, kann als komplettes Gerät aufgebaut werden (Bild 9.1). Diese Konstruktionsvariante hat einige Vorteile im praktischen Gebrauch, erfordert aber einen recht hohen Aufwand. Soll der Drehzahlmesser genau arbeiten, so benötigt man ein

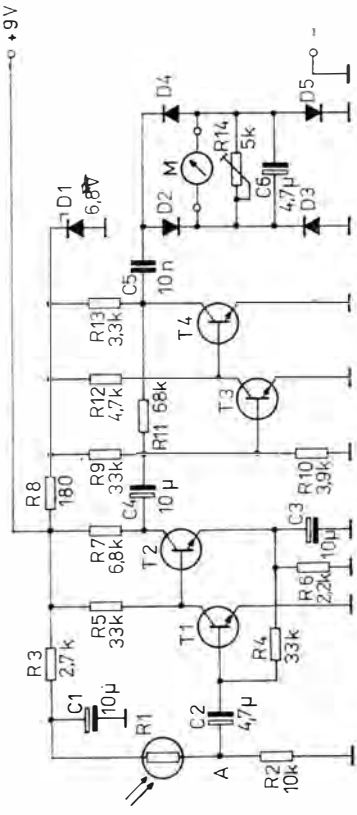
Bild 9.1
Analoger Drehzahlmesser

Bild 9.2
Analoger Drehzahlmeßzusatz zum Vielfachmeßgerät

empfindliches Meßwerk mit hoher Auflösung und Anzeigegenauigkeit (möglichst 1,5% Klasse). Ein solches Meßwerk wird aber mit Abstand das teuerste Bauteil des Drehzahlmessers sein.
Die Überlegungen gingen nun dahin, ein bereits in der Amateurwerkstatt vorhandenes hochwertiges Meßinstrument mit einem Zusatz zu versehen und zur Drehzahlmessung zu verwenden. Besonders geeignet dazu ist das Vielfachmeßgerät (Bild 9.2), das mit 1,5% Genauigkeit, 90 mm Skalenlänge und 50μA Empfindlichkeit die gestellten Bedingungen gut erfüllt.
Für beide Varianten werden dem Leser die Konstruktionsunterlagen vorgestellt.

Variante 1: Drehzahlmeßzusatz zum Vielfachmeßgerät

Die Schaltung (Bild 9.3) enthält die in Abschnitt 9. genannten Funktionsgruppen. Im Eingang des kontaktlosen Drehzahlmessers liegt der Fotowiderstand R2, dessen Widerstandswert sich je nach der einfallenden Lichtstärke ändert. Die besondere Eigenschaft des Fotowiderstands besteht darin, daß schon geringe Lichtstärkeschwankungen zu relativ großen Änderungen des Widerstandswerts führen. Da der Fotowiderstand über R3 an die Batteriespannung $U_B = 9$ V angeschlossen ist, entsteht durch Änderung seines Widerstandswerts am Punkt A eine Wechsel- bzw. Impulsspannung. Dem Fotowiderstand ist ein 2stufiger Verstärker nachgeschaltet. Durch die galvanische Kopplung von T2 und den relativ großen Emitterwiderstand R6 sowie die Gegenkopplung über R4 auf die Basis von T1 erreicht man eine sehr gute Temperaturstabilisierung des Arbeitspunkts. Die auf diese Weise verstärkten Impulse steuern den angeschalteten Trigger dynamisch über C4 an. Der Trigger formt aus den in der Amplitude noch recht unterschiedlichen Impulsen (je nach den Meßbedingungen) exakte Rechteckimpulse mit steilen Flanken. Den Arbeitspunkt des Triggers kann man mit R9 genau einstellen. Die eigentliche Messung wird dann durch das Vielfachmeßgerät, das in der Diagonalen der Meßbrücke (D4, ..., D5) liegt, durchgeführt.
Die gesamte Elektronik ist auf einer kleinen Leiterplatte (Bild 9.4) montiert, die zusammen mit der Batterie (6 F 22) in einem kleinen Plastgehäuse untergebracht ist (Bild 9.5). Das Plastgehäuse hat genau vor dem Fotowiderstand eine 7-mm-Bohrung.



M: 50 µA
T1...T4: SC 236 o.ä.
R1: RPP130 o.ä.
D2, D3: GA100 o.ä.; D4, D5: SAY12 o.ä.

Bild 9.3 Stromlaufplan des Drehzahlmeßzusatzes

Der Zusatz wird über einen Schiebeschalter ein- und ausgeschaltet. Der Betriebsstrom beträgt etwa 10 mA, so daß die vorgesehene kleine Batterie (je nach Meßhäufigkeit) etwa ein Jahr reicht; man darf nur nicht das Ausschalten vergessen.
Für den Abgleich des Drehzahlmeßzusatzes ersetzt man R9 durch einen Einstellregler 100 kΩ und mißt die Spannung über R13. Der Arbeitspunkt ist gefunden, wenn der Trigger gerade umschaltet (ohne Signal am Eingang). R9 wird ausgemessen und durch einen Festwiderstand ersetzt. Den Drehzahlmeßzusatz

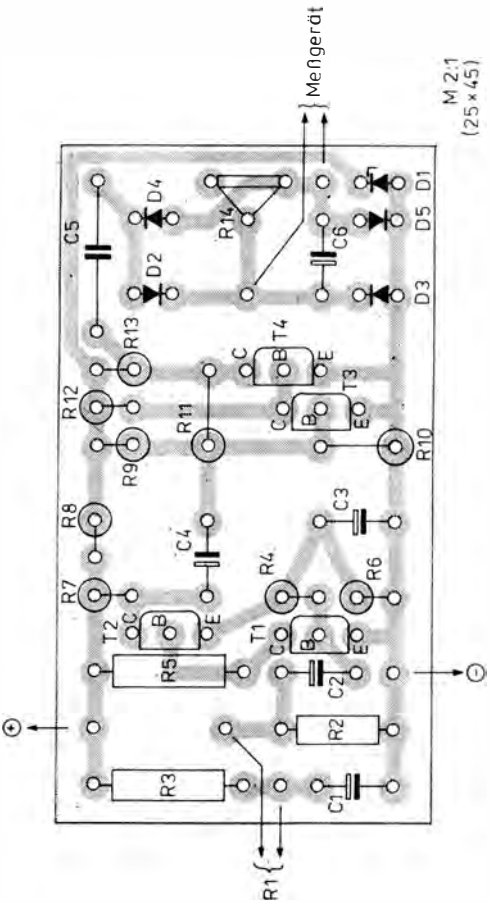


Bild 9.4 Bestückungsplan des Drehzahlmeßzusatzes

kalibriert man mit R14. Der Vorgang selbst wird weiter hinten beschrieben.

Variante 2: Drehzahlmeßgerät

Der Unterschied bezüglich der Schaltung für den Drehzahlmesser nach Bild 9.6 zu dem Drehzahlmeßzusatz nach Bild 9.3 ist geringfügig. Im Eingang befindet sich wieder der Fotowiderstand,

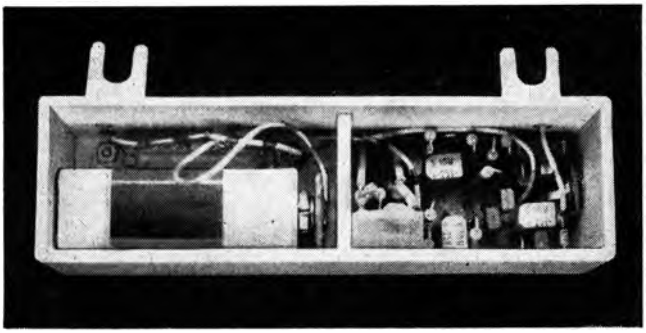
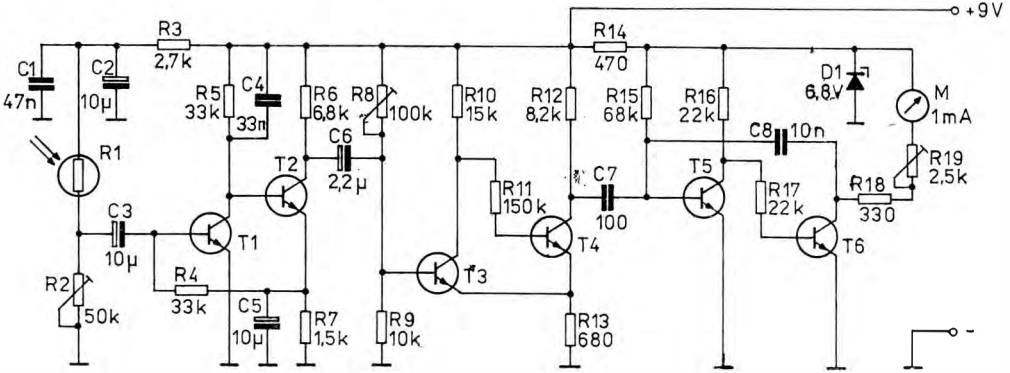


Bild 9.5 Innenaufbau des Drehzahlmeßzusatzes

daran schließt sich der Impulsverstärker mit T1, T2 an. Der *Schmitt*-Trigger mit T3, T4 formt die Impulse, die den monostabilen Multivibrator mit T5, T6 ansteuern. Als Impulsmaß dient bei dieser Auswertemethode der mittlere Kollektorstrom von T6, der vom Meßwerk M angezeigt wird.

Bei dieser Konstruktionsvariante ist es nicht erforderlich, die Leiterplatte platzsparend zu entwerfen (Bild 9.7). Batterie und Elektronik werden in einem lichtdichten Gehäuse, in dem an der Stirnseite die Linse und auf der Oberseite das Meßinstrument angebracht sind (Bild 9.8), eingebaut.

Zur Verstärkung der Lichtwirkung auf den Fotowiderstand setzt man vor denselben eine Sammellinse von etwa 20 mm Durchmesser und mit einer Brennweite von 35 bis 50 mm. Die Sammellinse wird in die Stirnwand des ansonsten lichtdichten Blechgehäuses eingebaut und so justiert, daß man den Fotowiderstand deutlich vergrößert sieht. Dabei ist der normale Betrachtungsabstand von 25 bis 30 cm in Richtung der optischen Achse einzuhalten. Um Fehlmessungen durch unkontrollierte Reflexionen oder seitliches Streulicht zu vermeiden, wird auf die Sammellinse ein innen geschwärzter Tubus von 20 mm Länge gesetzt. Eine entsprechende Sammellinse kann man aus einer kleinen Lupe ausbauen oder beim Optiker erhalten. Ist die Linse nicht gefaßt, so fertigt man den Lichtschutztubus genau nach dem Linsendurchmesser und klebt die Linse mit Zweikomponentenkleber direkt in den Tubus ein. Zur Erleichterung der Justierung wird der Fotowiderstand in eine Klemmfassung, in der



T1 ... T6 : SF 132 o.ä.
R1 : RPP130 o.ä.

Bild 9.6 Stromlaufplan des analogen Drehzahlmessers

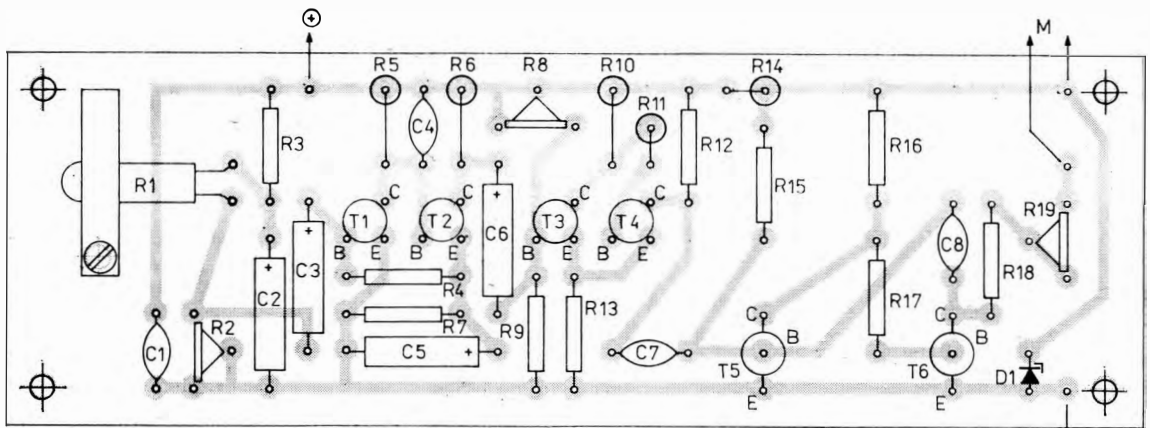


Bild 9.7 Bestückungsplan des analogen Drehzahlmessers

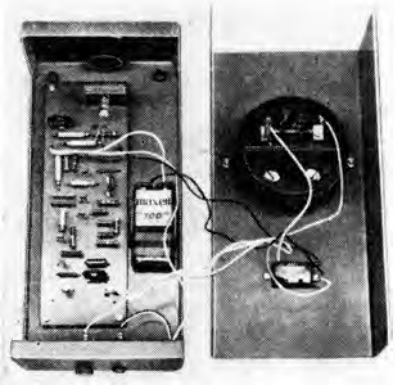


Bild 9.8
Innenaufbau des analogen Drehzahlmessers

Längsachse verschiebbar, eingebaut. Da der Drehzahlmesser dem rauhen Modellbetrieb standhalten soll, baut man sich ein stabiles lichtdichtes Gehäuse. Der Strombedarf des Drehzahlmessers beträgt etwa 10 mA. Zur Stromversorgung reicht eine 9-V-Transistorbatterie aus. Dem kommt entgegen, daß Drehzahlmessungen in der Regel nicht sehr oft und dann nur kurzzeitig vorgenommen werden. Die Batterie wird in einer Klemmfassung neben der Platine im Gehäuse befestigt. Das Meßinstrument ist im Deckel des Gehäuses befestigt.

Abgleich des Drehzahlmessers:

— Einstellung des Arbeitspunkts des Triggers. Man regelt R10 in der Weise ein, daß bei Signal am Eingang am Meßgerät ein Ausschlag zustande kommt.

— Kalibrierung des Drehzahlmessers.
Problematisch ist für den Amateur immer das Kalibrieren eines selbstgebauten Meßgeräts. Im vorliegenden Fall nutzt man zur Kalibrierung einfach die Tatsache aus, daß der technische Wechselstrom eine konstante Frequenz von 50 Hz hat. Das bedeutet, eine Glühlampe leuchtet in der Sekunde $50 \cdot 2 = 100$mal auf. Da Drehzahlen je Minute gemessen werden, liefert eine Glühlampe also $60 \cdot 100 = 6000$ Lichtimpulse je Minute. Der kontaktlose Drehzahlmesser ist in der Lage, selbst eine noch höhere Anzahl Lichtimpulse je Minute zu unterscheiden und damit zu zählen — zu messen.
Zur Kalibrierung des kontaktlosen Drehzahlmessers bringt

man die Sammellinse in die Nähe einer Glühlampe. Entsprechend den vorstehenden Erläuterungen stellt man mit dem Potentiometer R14 den Zeigerausschlag genau auf 6000 Umdrehungen je Minute ein. Da man ein Drehspulmeßgerät mit linearer Anzeigecharakteristik verwendet, stimmt die Kalibrierung auch für höhere Werte, also für 10 000 U/min und sogar für 20000 U/min. Da man den Drehzahlmesser auch für Drehzahlmessungen in Flugmodellen verwenden kann, eine Luftschraube aber 2 Lichtimpulse je Umdrehung liefert, wird das bei der Anwendung für den Motorprüfstand gleich berücksichtigt. Die Bremsscheibe erhält 2 helle und 2 dunkle Sektoren und erzeugt damit auch 2 Lichtimpulse je Umdrehung.

Bei dieser Auslegung nimmt der Drehzahlmesser z. B. bei 3000 U/min 6000 Impulse auf. Das wird bei der Kalibrierung berücksichtigt. Mit R14 gleicht man den Zeigerausschlag also nicht, wie zuerst erläutert, auf 6000 U/min, sondern auf nur 3000 U/min ab (bei Beleuchtung mit einer netzgespeisten Lampe). Dann läßt sich im praktischen Betrieb die Motordrehzahl sefort ablesen. Zu beachten ist, daß alle Messungen auf dem Motorprüfstand bei „Gleichlicht" (Taschenlampe oder Tages-

Bild 9.9
Multimeter mit eingebautem Drehzahlmeßzusatz

licht) vorgenonmen werden müssen. Die Beleuchtung mit netzgespeisten (Wechselstrom) Glühlampen führt zu Fehlmessungen. Für den Amateur ist sicher interessant, daß auch industriell hergestellte Universalmeßgeräte mit einem, übrigens auch transistorisierten, eingebauten Drehzahlmeßzusatz ausgestattet werden. Beispiel ist das in Japan hergestellte Multimeter (Bild 9.9), das speziell für Strom-, Spannungs- und Drehzahlmessungen des Modellbetriebs ausgelegt wurde.

9.2. Kontaktloser elektronischer Drehzahlmesser mit digitaler Anzeige

Durch Verwendung neuer Bauelemente läßt sich die Meßgenauigkeit des Drehzahlmessers erhöhen und der Aufwand gleichzeitig verringern. Der kontaktlose Drehzahlmesser mit digitaler Anzeige von *S. Kottisch* (veröffentlicht in [19], H. 12/77) ist dafür ein Beispiel.

Die prinzipielle Funktion sei zunächst am Übersichtsschaltbild (Bild 9.10) erläutert. Die von der Luftschraube oder einer Hell-Dunkel-Markierung kommenden Lichtschwankungen werden von einem Fotowiderstand in elektrische Impulse umgewandelt, die — verstärkt — auf eine Torstufe gelangen. Die Öffnungszeit der Torstufe bestimmt der Torzeitgenerator. So lange, wie das Tor geöffnet ist (t_1), gelangen die Impulse an den Eingang der Zählschaltung. Der erste Zähler zählt bis 9, der 10. Impuls wird an die nächste Dekade weitergegeben. Da nur eine 2stellige Anzeige vorhanden ist, erreicht der Zähler nach 100 Impulsen (entspricht $10\,000 \cdot \text{min}^{-1}$) den Ausgangszustand. Das muß beim Messen beachtet werden, denn alle Impulse (Drehzahlen) über 10000 hinaus werden so angezeigt, als wären die vorher gezählten 10000 U/min gar nicht vorhanden. 14000 U/min werden also als 4000 U/min angezeigt. Da der Modellbauer aber aus der Erfahrung beurteilen kann, ob der Motor 14000 U/min oder nur 4000 U/min dreht, kann man die Zweideutigkeit hinnehmen, und die dritte Anzeigestelle wäre höchstens zur Verbesserung der Ablesegenauigkeit wünschenswert. Die Anzeige ist während der Meßzeit dunkelgetastet. Nach Beendigung der Meßzeit schließt der Torzeitgenerator das Tor und zeigt den gespeicherten Meßwert an der Anzeige an (Ablesezeit t_2). Die Meßge-

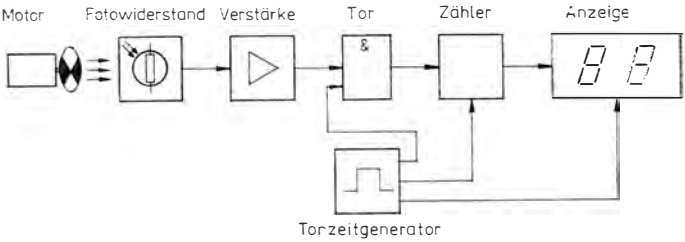
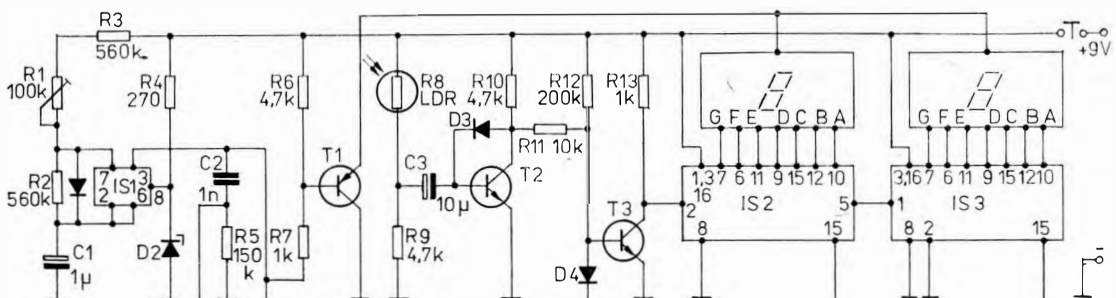


Bild 9.10 Übersichtsschaltung des Drehzahlmessers mit digitaler Anzeige

nauigkeit wird von der Stabilität des Torgenerators und dessen Kalibrierung bestimmt. Die Ablesegenauigkeit ist durch die 2 Ziffernanzeigen mit 1 % gegeben. Sie ist damit wesentlich besser als die vom Amateur realisierbaren Analoganzeigen (Zeigerinstrumente ohne Spiegel der Klasse 2,5 %). 1 % Genauigkeit bedeutet für 10 000 U/min eine Abweichung von $\pm$ 100 U/min. In diesem Fall erhält man für die Torzeit = Meßzeit t_1 = 0,01 min = 0,6 s und für 2 Lichtimpulse je Umdrehung t_1 = 0,30 s = 300 ms.

Funktion der Schaltung

Das Herz des Torzeitgenerators ist der hochstabile Timer *555*. Mit R1 wird die Torzeit (t_1) eingestellt, R2 bestimmt die Ablesezeit (t_2). Mit dem Differenzierglied C2, R5 gewinnt man aus der Vorderflanke des Torimpulses den Resetimpuls für die beiden Zähldekaden. Der Torimpuls tastet während der Meßzeit über T1 die Anzeige dunkel. Wer darauf (und auf T1) verzichtet, muß während des Meßvorgangs eine flimmernde Anzeige in Kauf nehmen. Transistor T2 reicht zur Impulsverstärkung aus. Das Tor bildet T3. Gelangt der Torimpuls über D4 an die Basis von T3, so wird T3 leitend, und die Impulse gelangen an den Eingang (Pin 2) der ersten Zähldekade. IS2 und IS3 vereinigen in sich Zähldekaden, 7-Segment-Dekoder und Treiber für die Ziffernanzeige. Es ist keine weitere externe Beschaltung erforderlich. Optik und mechanischer Aufbau entsprechen dem Drehzahlmesser mit analoger Anzeige, nur das Gehäuse fällt wesentlich kleiner aus (doppelte Streichholzschachtelgröße!). Kalibriert wird die Anzeige mit Netzfrequenz (R2 so einstellen, daß auf der Anzeige 30 $\triangleq$ 3000 U/min abzulesen ist).



T1 : BC177 Ziffernanzeige
T2,T3: BC107 „MAN3" oder „CQY25"
D1,D3: Si-Univ. (gemeinsame Katode)
D2 : ZD 6,2V
D4 : Ge-Univ.
IS1 : 555
IS2,IS3: CD 4026

Bild 9.11 Stromlaufplan des Drehzahlmessers mit digitaler Anzeige

9.3. Gleichstrommeßzusatz zum Vielfachmeßgerät

Bei den ersten Messungen auf dem Motorprüfstand wird man feststellen, daß die Strommessungen problematisch sind. In dem Augenblick, wo man einen Scheibenwischermotor oder gar einen Elektroflug- oder Rennbootmotor abbremst, ist die 5-A- bzw. 6-A-Grenze, die ein Vielfachmeßgerät setzt, schnell überschritten. Die Schlußfolgerung daraus wäre der Kauf eines Amperemeters mit einem Meßbereich bis 20 A oder gar 25 A. Da man ein solches Meßgerät, mal abgesehen vom Preis, doch recht selten benötigt, ist die Suche nach einem Ausweg berechtigt. Wen wundert es? — die Elektronik hilft auch in diesem Fall. Mit einem Operationsverstärker und einigen zusätzlichen Bauteilen wird ein Millivoltmeterzusatz zum Vielfachmeßgerät gebaut. Zur Funktion des Operationsverstärkers soll an dieser Stelle nur so viel bemerkt werden. Es handelt sich um einen Integrierten Schaltkreis zur Verstärkung von Gleichspannungen. Die Spannungsverstärkung eines Operationsverstärkers, z. B. des *A 109*, beträgt laut Datenblatt $v_u = 30 \cdot 10^3$, also das 30 000fache. Für viele Anwendungen, auch die beabsichtigte, wird eine so hohe Verstärkung gar nicht benötigt. Durch geeignete Gegenkopplung kann sie auf den gewünschten kleineren Wert genau eingestellt werden. Im vorliegenden Fall werden die Ströme über eine Spannungsmessung ermittelt. Die Kupferleitungen von Antriebsbatterie zum Motor haben einen kleinen Widerstand, der aber für die Messung völlig ausreicht. An anderer Stelle wurde bereits betont, daß man zur Verringerung der Leitungsverluste möglichst Kupferdraht mit einem Querschnitt von $A = 1{,}5\ \text{mm}^2$ verwenden sollte.
Nach der Gleichung

$$R = \frac{\varrho l}{A}, \tag{54}$$

mit R — Widerstand des Leiters, ϱ — spezifischer Widerstand des Leitermaterials, l — Leiterlänge, A — Querschnitt des Leiters, berechnet man den Widerstand eines 15 cm langen Leiterstücks zu

$$R_{Cu} = \frac{0{,}0175\,\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot 0{,}15\ \text{m}}{\text{m} \cdot 1{,}5\ \text{mm}^2} = 0{,}00175\,\Omega = 1{,}75\ \text{m}\Omega.$$

Der Motorstrom ruft an diesem Widerstand einen Spannungsabfall hervor, der sich nach dem Ohmschen Gesetz
für $I_{Mot} = 20\,A$ zu

$$U = IR = 20\,A \cdot 1{,}75\,m\Omega = 35\,mV \qquad (55)$$

ergibt. Diesen Spannungsabfall verstärkt der Meßzusatz dann so weit, daß er mit dem Vielfachmeßgerät mit der erforderlichen Genauigkeit gemessen werden kann. Die Verstärkung des Operationsverstärkers reicht sogar aus, um auch den Spannungsabfall an noch kürzeren Leiterstücken, z. B. 5 cm oder sogar 3 cm, zur Messung zu nutzen.
Da man den Wert eines Stromes bestimmen will, interessiert nur für die Funktion, daß das über eine Spannungsmessung, also indirekt geschieht. Bei der Erprobung wurde am Vielfachmeßgerät der 25-mA-Meßbereich geschaltet und das Ergebnis gleich in Ampere abgelesen.
Verwendet wird der Operationsverstärker *A 109* im DIL-Gehäuse (Bild 9.12). Austauschtypen sind *K 1 YT 531* — SU, *TAA 501* — Tesla, *TAA 521* — Siemens, *TL 1709* — AEG/Tele-

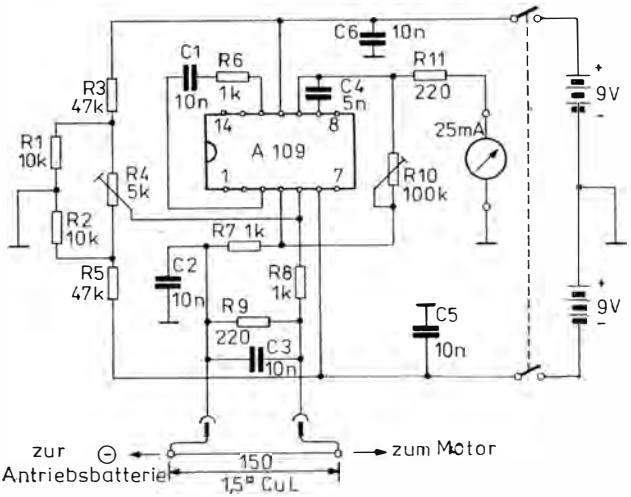


Bild 9.12 Stromlaufplan des Gleichstrommeßzusatzes mit dem OPV *A 109*

funken, *A 709* — SGS/Ates, *SN 52709* — TI. Die Verstärkung stellt man mit dem Verhältnis R_7/R_{10} ein und gleicht damit den Meßzusatz ab. Mit dem Netzwerk R1 bis R5 wird die Offsetspannung kompensiert und damit der Nullpunkt eingestellt. Verwendet man den Typ *R 109* (wesentlich billiger als *A 109*), so muß eine größere Offsetspannung kompensiert werden. In dem Fall ist der Wert von R4 gegebenenfalls zu verdoppeln. Die Bauelemente C1, R6, C4 dienen zur Frequenzgangkompensation des Operationsverstärkers; ihre Funktion ist bei der vorliegenden Anwendung nebensächlich. Da der Ausgang des Operationsverstärkers nicht kurzschlußfest ist, wird dem Meßgerät mit R11 ein Schutzwiderstand vorgeschaltet. Der hochempfindliche Verstärker ist mit C2, C3 abgeblockt, damit HF-Einstreuungen von der Fernsteueranlage oder Motorstörungen keine Schwingungen verursachen.

Der Meßzusatz (Bild 9.13 und Bild 9.14) wird zusammen mit 2 9-V-Transistorbatterien in einem abgeschirmten Gehäuse (aus Platinenmaterial herstellen) untergebracht. Man kann es ähnlich wie den Drehzahlmeßzusatz ansteckbar zum Vielfachmeßgerät konstruieren (s. a. Bild 9.2).

Zum Abgleich des Gleichstrommeßzusatzes folgende Hinweise: Man wählt ein geeignetes Leiterstück von 10 bis 15 cm Länge, das am Prüfstand immer zum Verbinden von Motor und Batterie dient, und lötet über dünne Litze die Eingänge ⊕ und ⊖ an. Man kann auch Buchsen und normale Meßschnüre verwenden, nur muß die Meßstrecke immer genau gleich sein. Für den Abgleich

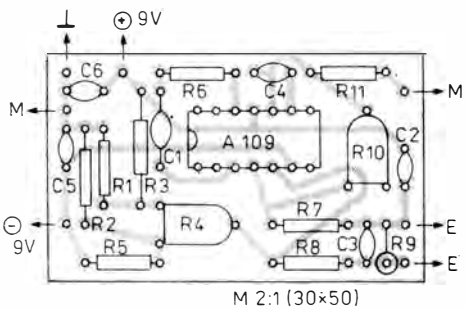


Bild 9.13 Bestückungsplan des Gleichstrommeßzusatzes

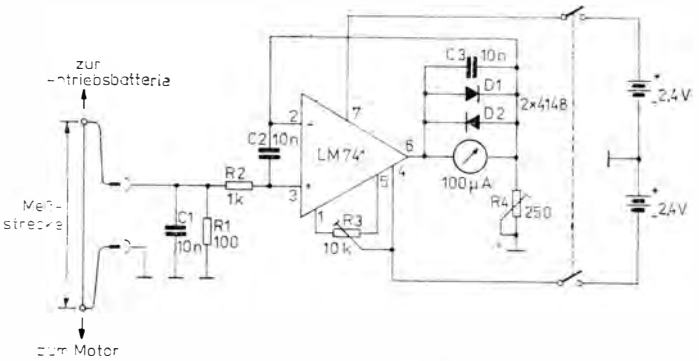


Bild 9.14 Gleichstrommeßzusatz mit dem OPV *LM 741 C*

wird der Motor durch eine Lampe 12 V/21 W oder 12 V/50 W (Bilux) ersetzt. Im Stromkreis befindet sich ein weiteres Amperemeter zum Kalibrieren. Bei abgeschalteter Lampe stellt man mit R4 den Nullpunkt ein. Bei angeschalteter Lampe wird der Zeigerausschlag mit R10 auf den entsprechenden Wert, den das Amperemeter anzeigt, eingestellt. Benutzt man die 25-mA-Skale, dann entfallen Umrechnungen, und der Strom läßt sich direkt in Ampere ablesen. Da sich Verstärkung und Offsetspannungskompensation beeinflussen, muß der Vorgang von Nullpunkteinstellung und Kalibrierung mehrmals wiederholt werden, bis keine Änderung mehr eintritt.

Welche Vorteile bietet dieses Meßverfahren? Bei Strömen $I > 5$ A sind Leitungen, Kontakte und Strommeßgeräte Ursache zusätzlicher Spannungsabfälle, die das Meßergebnis beeinflussen. Dicke Schnüre, Klemmen, Starkstromstecker u. ä. sind dazu noch recht unhandlich. Alle diese Mängel vermeidet das vorgeschlagene Meßverfahren, das als Meßwertgeber die ohnehin vorhandene Leitung zwischen Motor und Batterie nutzt. Damit sind nun auch Messungen am bzw. mit im Modell eingebautem Antrieb möglich. Als Nachteil sei vermerkt, daß eine Spannungsquelle mit 2×9 V erforderlich ist. Die handlichste Form ergeben 2 9-V-Transistorbatterien; 4 Flachbatterien (3 R 12) reichen aber auch aus und sind billiger.

Den genannten Mangel vermeidet die von *H. W. Müller* (in [19], H. 12/78) vorgeschlagene Schaltung. Bei dieser Schaltung

(Bild 9.14) wird ein spezieller Operationsverstärker, ein Differenzverstärker, verwendet, der mit 2 × 2,4 V Speisespannung auskommt.

Damit läßt sich eine ohnehin vorhandene Empfängerbatterie als Spannungsquelle verwenden. Die Schaltung arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Gemessen wird der Spannungsabfall an einem Leiterstück. Mit R3 stellt man den Nullpunkt ein, und mit R4 kalibriert man den Meßzusatz. Da der Ausgang des Differenzverstärkers kurzschlußfest ist, kann das Mikroamperemeter direkt angeschaltet werden. Die Dioden D1, D2 sind als Schutz für das Meßwerk vor Überlastungen geschaltet. Für diesen Meßzusatz kann aber genausogut ein Vielfachmeßgerät verwendet werden.

Da bei diesem Meßverfahren im Prinzip kein Eingriff in den Antriebsstromkreis notwendig ist, entfallen auch Rückwirkungen vom Meßstromkreis auf den Antriebsstromkreis. Damit kann ein Motor auf dem Prüfstand unter unverfälschten Bedingungen untersucht werden. Darüber hinaus sind nun auch Strommessungen im Modell für Justierarbeiten des Antriebs (Motor — Kupplung — Welle — Lager) oder Standschubmessungen sehr elegant möglich.

10. Schlußbemerkungen

Das Ziel der vorliegenden 3 Broschüren besteht darin, dem Leser in leichtverständlicher Form und nur mit dem notwendigen mathematischen Apparat einen Überblick über die elektrischen und elektronischen Probleme des Modellantriebs zu geben.

Bei vielen Dingen, vor allem bei der Steuerung des Motors, konnten nur einige Beispiele exemplarisch und damit stellvertretend für andere ähnliche Lösungen vorgestellt werden. Grundprinzip der Auswahl war die praktische Anwendbarkeit bewährter Schaltungen; es sollten aber auch Anregungen für neue Schaltungslösungen gegeben werden.

Damit erhält der Amateur einmal die Möglichkeit, sich ohne Schwierigkeiten in das Gebiet einzuarbeiten, er bekommt aber auch Hinweise, wie eigene Ideen u. U. weiterentwickelt werden können. Diese eigene Idee bzw. Eigeninitiative gilt auch für die Bauelementebeschaffung. Die Schaltungen können in der Regel mit Austauschbauelementen bestückt werden. Damit ist es den Interessenten möglich, an Hand von Vergleichslisten geeignete im Handel befindliche Typen auszuwählen und zu verwenden.

Die Anwendbarkeit stand auch bei den chemischen Spannungsquellen im Vordergrund. Spezielle Systeme, die keine praktische Bedeutung haben, wurden daher gar nicht vorgestellt. Auch auf die Solarzellen wurde nicht näher eingegangen, obwohl *F. Militky* und *H. Schenk* erfolgreich Solarzellenantriebe in Flugmodellen erprobten. Solange der Wirkungsgrad der Solarzellen nicht entscheidend verbessert wird, ist die breite praktische Anwendung für leistungsfähige Modellantriebe nicht gegeben.

Die Weiterentwicklung des Modellantriebs wird vor allem bei der Anwendung neuer wirksamer Magnetmaterialien, der Vervollkommnung der gasdichten Nickel-Kadmium-Sinterzellen und des gasdichten Bleiakkumulators liegen.

11. Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] Autorenkollektiv: Fachkunde Elektromaschinenbauer; VEB Verlag Technik, Berlin 1957

[2] *Eichinger, H.*: Automatisches Ladegerät für Nickel-Kadmium-Akkumulatoren; Siemens, Technische Kurzmitteilung

[3] Firmenprospekt: EKL — Kohlebürsten für Kleinmotoren; VEB Elektrokohle Lichtenberg, Berlin, Ausgabe 107/69

[4] Firmenprospekt Nr. 7015: dryfit PC-Batterien, dryfit-ST-Batterien, Ladetechnik, Spezialakkumulatoren; Sonnenschein GmbH, Büdingen 1975

[5] *Jakubaschk, H.*: Komplementärschaltungstechnik; Reihe „electronica", Bd. 154, Militärverlag der DDR, Berlin 1977

[6] *Kühne, H.*: Elektronisch gesteuerte Aufladung von Akkumulatoren. In: „Elektronisches Jahrbuch 1975", Militärverlag der DDR, Berlin 1974, S. 255 ff.

[7] *Kunath, H.*: Praxis der Funkentstörung; Dr. A. Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg 1965

[8] *Miel, G.*: Elektronische Modellfernsteuerung; Militärverlag der DDR, Berlin 1978

[9] Regeln der NAVIGA für internationale Meisterschaften und Wettbewerbe im Schiffsmodellsport und Schiffsmodellbau, Ausgabe 1974

[10] *Schönefeld, H.*: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik; S. Hirzel Verlag, Leipzig 1952

[11] *Schröder, H.*: Elektrische Nachrichtentechnik, Bd. I, II, III; Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin-Borsigwalde 1968

[12] *Warner, A.*: Taschenbuch der Funkentstörung; VDE-Verlag GmbH, 1970

Zeitschriften

[13] Flugmodell-Technik (BRD)

[14] FUNKAMATEUR (DDR)

[15] hobby bulletin (NL)

[16] Modelar (ČSSR)

[17] Modelist Konstruktor (UdSSR)

[18] Modelarz (Pl)
[19] Modell (BRD)
[20] modellbau heute (DDR)

Cheflektorat Militärliteratur
Lizenz-Nr. 5 · LSV: 3539
Lektor: Dipl.-Phys. Hans-Joachim Mönig
Zeichnungen: Johanna Goernemann
Typografie: Helmut Herrmann · Hersteller: Michael Haase
Korrektor: Ingeborg Kern
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme Potsdam
Redaktionsschluß: 15. März 1979
Bestellnummer: 746 129 3
DDR 1,90 M